CAD/CAM/CAE

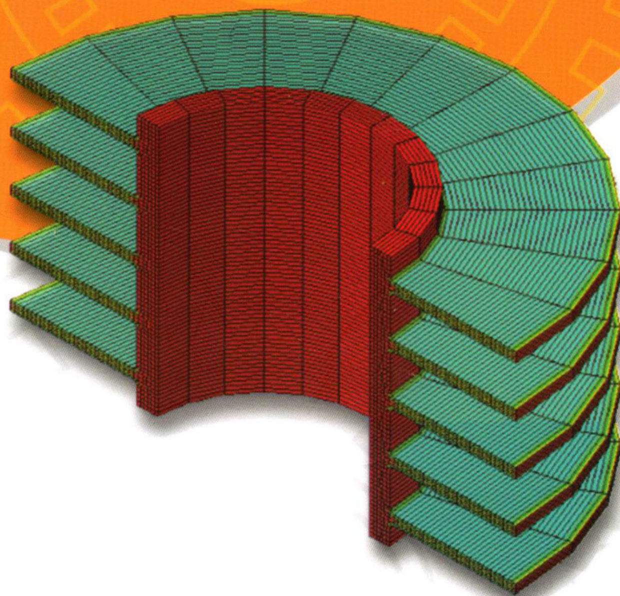
工程应用丛书

ANSYS系列

ANSYS 17.0 有限元分析从入门到精通

第2版

CAE应用联盟 组编 刘浩 等编著





关注机械工业出版社计算机分社官方微信订阅号"IT有得聊"，即可获得本书配套资源，包含全部案例素材文件和命令流代码。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

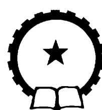
LANZAROTE Caliente.com

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

ANSYS 17.0 有限元分析从入门到精通

第 2 版

CAE 应用联盟　组　编
刘　浩　等编著



机 械 工 业 出 版 社

全书分基础介绍和实际工程应用两个层次讲述了 ANSYS 软件的使用方法，其工程背景深厚、内容丰富、讲解详尽，内容安排由浅入深，适用于不同层次的 ANSYS 用户。

全书共分 3 篇。第一篇为基础知识篇，内容包括 ANSYS 背景知识介绍、几何建模方法与技巧、网格划分技术、加载与求解技术、通用与时间后处理技术，以及 ANSYS 参数化设计语言专题知识。第二篇为机械工程应用篇，以机械工程中的常见问题，结合实例为原型按照不同的分析方式，分层次、分类别地进行了详尽的操作演示与方法教学。第三篇为土木工程应用篇，则根据土木工程中的不同问题，选取相关领域内最具代表性的工程问题为实例，进行建模及加载求解，并以工程中的常用技术控制指标为依据，进行后处理分析。

本书适合高等院校机械工程与土木工程等相关专业的高年级本科生、研究生作为自学参考用书，也可供上述专业的工程技术人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS 17.0 有限元分析从入门到精通/CAE 应用联盟组编；刘浩等编著.
—2 版.—北京：机械工业出版社，2017.6
（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书）
ISBN 978-7-111-58392-9

Ⅰ.①A…　Ⅱ.①C…　②刘…　Ⅲ.①有限元分析－应用软件
Ⅳ.①O241.82－39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 266381 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦　　责任编辑：张淑谦
责任校对：张艳霞　　责任印制：张　博
三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 1 月第 2 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·32.25 印张·785 千字
0001—3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-58392-9
定价：99.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
服务咨询热线：（010）88361066
读者购书热线：（010）68326294
　　　　　　　（010）88379203
封面无防伪标均为盗版

网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金 书 网：www.golden-book.com

前　　言



ANSYS 功能强大、简单易学，是目前最通用和有效的商业有限元软件之一，拥有较大的用户群。它融结构、传热学、流体、电磁、声学和爆破分析于一体，具有强大的前、后处理及计算分析能力，能够同时模拟结构、热、流体、电磁以及多种物理场间的耦合效应。

命令流是 ANSYS 软件的一大特色，功能强大且使用十分方便。命令流类似于 FORTRAN 语言，能够完成所有的分析过程。命令流也是 ANSYS 参数化有限元分析、分析批处理、优化设计、自适应网格以及二次开发的主要基础。用户掌握命令流方式后，能够极大地丰富分析手段，提高工作效率。

1. 本书特色

由浅入深，循序渐进：本书首先从 ANSYS 使用基础讲起，再辅以工程中的应用案例，帮助读者尽快掌握使用 ANSYS 进行有限元分析的技能。

步骤详尽、实例典型：本书基于 ANSYS 17.0，依托大量的工程实例讲解运用 ANSYS 高级有限元分析软件处理工程问题的方法与详细步骤。本书的目的是使读者系统掌握 ANSYS 的使用方法，能够对各种工程结构进行规划、建模、加载求解与结果处理，并编写相应的命令流文件。通过学习实际工程应用案例的具体操作是掌握 ANSYS 最好的方式。本书通过综合应用案例，透彻、详尽地讲解了 ANSYS 在多方面的应用。

内容充实、易学易懂：本书各专题实例中的每个例子都提供了 GUI 界面操作和 APDL 命令流两种分析方式，两种方式在效果上完全等价。其中，GUI 方式通俗易懂，且分析步骤一目了然；而 APDL 方式则方便、快捷，适合复杂问题的分析。读者应同时掌握两种分析方式，根据不同的具体问题，采用更为适合、便捷的方式。

2. 本书内容

本书以初中级读者为对象，结合作者多年 ANSYS 使用经验与实际工程应用案例，全面、系统地讲解了 ANSYS 的基础知识和综合应用。在讲解过程中，力求通俗易懂、步骤详尽、内容新颖，并辅以相应的典型案例，使读者在阅读时一目了然，从而快速掌握书中所讲内容。

全书共分 3 篇，即基础知识篇、机械工程应用篇和土木工程应用篇。

第一篇：基础知识篇，共 7 章，主要讲解 ANSYS 软件的基本应用。本篇按照 ANSYS 分析流程，逐步讲解模型的建立、单元控制、网格划分、加载、求解及后处理、参数化设计语言等，为后面更深入的应用打下基础。

第 1 章　绪论　　第 2 章　建立模型
第 3 章　单元与单元的控制　　第 4 章　网格划分
第 5 章　模型加载及求解分析　　第 6 章　求解与后处理

第 7 章　参数化设计语言

第二篇：机械工程应用篇，共 6 章。以机械工程中的常见问题为原型，进行了建模、分析计算和后处理操作，帮助读者掌握如何使用 ANSYS 解决机械工程中的常见问题。

第 8 章　结构静力学分析
第 9 章　结构动力学分析
第 10 章　加工过程仿真分析
第 11 章　装配与复合材料分析
第 12 章　锤击法施工仿真分析
第 13 章　起重机综合分析

第三篇：土木工程应用篇，共 6 章。涵盖了土木工程方面的典型工程实例，具有非常重要的参考价值。通过本篇的学习，读者可以掌握如何使用 ANSYS 解决土木工程中的常见问题。

第 14 章　钢筋混凝土基本问题分析
第 15 章　钢结构及钢筋混凝土结构分析
第 16 章　膜结构及网壳结构分析
第 17 章　基础工程分析
第 18 章　桥梁工程实例分析
第 19 章　隧道工程实例分析

3. 读者对象

本书适用范围广，可为以下读者提供帮助。

- 大中专院校的在校生
- 相关培训机构的教师和学员
- 参加工作实习的“菜鸟”
- 有限元分析爱好者
- 广大科研工作人员
- 初中级 ANSYS 从业人员
- 初学 ANSYS 有限元分析的技术人员

4. 读者服务

如果在学习过程中遇到与本书有关的技术问题，可以发邮件到邮箱 caxart@126.com，或者访问博客 http://blog.sina.com.cn/caxart，作者会尽快给予解答，竭诚为您服务。

5. 本书作者

本书主要由刘浩编著，另外丁金滨、石良臣、林金宝、张亮亮、高飞、李昕、唐宗鹏、凌桂龙、王芳、张岩、韩希强、孙国强、于苍海、温正、陈艳霞、郭海霞、张建伟、刘成柱、宋玉旺、沈再阳、陈峰浩、张文电、丁凯、王菁和李战芬也参与了本书的编写工作，在此一并表示感谢。

虽然作者在本书的编写过程中力求叙述准确、完善，但由于水平有限，书中欠妥之处在所难免，希望读者和同仁能够及时指出，共同促进本书质量的提高。

最后再次希望本书能为读者的学习和工作提供帮助！

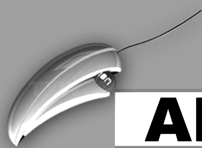
作者

目　录



第一篇　基础知识篇

第 1 章　绪论 …… 2
1.1　有限单元法概述 …… 2
1.1.1　有限元法历史 …… 2
1.1.2　有限单元法的基本概念 …… 3
1.2　ANSYS 17.0 基本操作 …… 3
1.2.1　ANSYS 17.0 的启动与退出 …… 4
1.2.2　ANSYS 17.0 操作界面 …… 4
1.2.3　ANSYS 17.0 文件管理 …… 7
1.2.4　ANSYS 17.0 有限元分析流程 …… 10
1.3　本章小结 …… 11
第 2 章　建立模型 …… 12
2.1　建模前知识准备 …… 12
2.1.1　量纲问题 …… 12
2.1.2　坐标系问题 …… 14
2.2　自底向上建模 …… 18
2.2.1　模型尺寸及相关参数 …… 18
2.2.2　建模过程 …… 18
2.3　自顶向下建模 …… 20
2.3.1　相关参数 …… 20
2.3.2　建模过程 …… 20
2.3.3　布尔运算常用命令 …… 21
2.4　直接建立有限元模型 …… 22
2.4.1　节点的生成 …… 22
2.4.2　单元的生成 …… 22
2.5　一些快速建模命令 …… 24
2.5.1　复制命令 …… 24
2.5.2　镜像命令 …… 24
2.5.3　对象的选择与删除 …… 24
2.6　CAD 几何模型导入 …… 25
2.7　本章小结 …… 26
第 3 章　单元与单元的控制 …… 27
3.1　ANSYS 单元介绍 …… 27
3.1.1　结构单元 …… 27
3.1.2　热单元 …… 51
3.1.3　电磁单元 …… 52
3.1.4　耦合场单元 …… 55
3.1.5　流体单元 …… 56
3.2　单元属性的设置 …… 57
3.2.1　单元类型（TYPE） …… 57
3.2.2　实常数（REAL） …… 58
3.2.3　材料属性（MAT） …… 58
3.2.4　截面特性设置（SECTION） …… 59
3.3　本章小结 …… 60
第 4 章　网格划分 …… 61
4.1　网格的控制 …… 61
4.1.1　智能网格划分 …… 61
4.1.2　全局单元尺寸控制 …… 62
4.1.3　关键点尺寸控制 …… 63
4.1.4　线尺寸控制 …… 63
4.1.5　面尺寸控制 …… 65
4.2　简单网格划分实例 …… 65
4.2.1　几何模型的导入 …… 66
4.2.2　定义单元属性 …… 66
4.2.3　网格的控制 …… 66
4.2.4　网格的清除 …… 68
4.2.5　局部网格 …… 69
4.3　通过拉伸生成网格 …… 69
4.4　映射网格划分 Mapped …… 71



4.4.1 多边形面的映射网格划分 ……… 71
4.4.2 多面体的映射网格划分 ………… 72
4.5 扫掠网格划分 Sweep ………… 73
4.5.1 体扫掠基本知识………………… 73
4.5.2 体扫掠的操作步骤与使用条件 ……………………………… 73
4.6 本章小结 …………………………… 75
第 5 章 模型加载及求解分析…………… 77
5.1 加载的基础知识 ………………… 77
5.1.1 荷载的种类 ……………………… 77
5.1.2 加载术语 ………………………… 78
5.1.3 加载类型及特点………………… 79
5.2 施加约束 ………………………… 80
5.2.1 在关键点（或节点）上加载位移约束 ………………………… 80
5.2.2 在线（或面）上加载位移约束 …………………………… 81
5.2.3 对称约束与反对称约束 ……… 81
5.2.4 耦合 ……………………………… 82
5.2.5 约束方程 ………………………… 84
5.3 施加荷载 ………………………… 85
5.3.1 集中荷载 ………………………… 85
5.3.2 表面荷载 ………………………… 86
5.3.3 体积荷载 ………………………… 88
5.3.4 惯性荷载 ………………………… 90
5.3.5 耦合场荷载 ……………………… 90
5.3.6 轴对称荷载与反作用力 ……… 91
5.3.7 初应力荷载 ……………………… 92
5.3.8 由表型数组定义荷载 ………… 92
5.3.9 荷载显示与控制………………… 94
5.4 设定分析类型与求解方法 ……… 94
5.4.1 分析类型设置 …………………… 95
5.4.2 分析基本选项设置……………… 95
5.5 荷载步文件法 …………………… 96
5.5.1 荷载步文件的建立 …………… 96
5.5.2 荷载步文件法求解 ……………… 97
5.5.3 荷载步文件的查看、修改或删除 ……………………………… 97
5.6 本章小结 …………………………… 97
第 6 章 求解与后处理…………………… 98
6.1 通用后处理器 …………………… 98
6.1.1 读入结果文件 ………………… 98
6.1.2 分析结果的绘图显示 ………… 99
6.1.3 结果查看器 ……………………… 104
6.1.4 分析结果的列表显示 ………… 105
6.1.5 结果的运算处理 ……………… 107
6.1.6 转换结果到不同的坐标系……… 109
6.1.7 荷载工况 ………………………… 109
6.2 时间历程后处理器……………… 111
6.2.1 时间历程后处理对话框介绍 …… 111
6.2.2 定义变量 ………………………… 113
6.2.3 变量运算 ………………………… 114
6.2.4 变量与数组 ……………………… 114
6.2.5 变量的显示 ……………………… 115
6.3 本章小结…………………………… 116
第 7 章 参数化设计语言 ……………… 117
7.1 参数化设计语言基础知识……… 117
7.1.1 APDL 语言的输入……………… 117
7.1.2 APDL 语言的参数……………… 117
7.1.3 APDL 语言的流程控制 ……… 127
7.1.4 宏文件…………………………… 129
7.1.5 函数、运算符以及常用控制命令 ……………………… 132
7.2 APDL 命令流应用详解 ………… 144
7.2.1 模型的建立 ……………………… 144
7.2.2 网格划分………………………… 147
7.2.3 边界条件………………………… 148
7.2.4 求解 ……………………………… 149
7.3 本章小结…………………………… 150

第二篇　机械工程应用篇

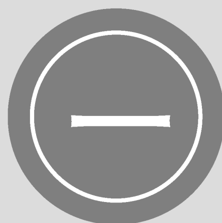
第 8 章　结构静力学分析 ………………… 152
8.1　基础知识 ………………… 152
8.2　六角扳手静力学分析 ………………… 154
8.2.1　问题描述 ………………… 154
8.2.2　问题求解与分析 ………………… 155
8.3　桁架结构静力学分析 ………………… 166
8.3.1　问题描述 ………………… 166
8.3.2　问题求解与分析 ………………… 167
8.4　高压气罐静力学分析 ………………… 175
8.4.1　问题描述 ………………… 175
8.4.2　问题求解与分析 ………………… 175
8.5　本章小结 ………………… 190
第 9 章　结构动力学分析 ………………… 191
9.1　结构动力学基础知识 ………………… 191
9.1.1　关于荷载 ………………… 191
9.1.2　结构动力学问题的分类 ………………… 192
9.2　ANSYS 模态分析 ………………… 193
9.2.1　模态提取方法 ………………… 193
9.2.2　网架的模态分析 ………………… 194
9.3　ANSYS 谐响应分析 ………………… 205
9.3.1　谐响应分析的方法 ………………… 206
9.3.2　吉他发声过程仿真分析 ………………… 207
9.4　ANSYS 瞬态动力学分析 ………………… 220
9.4.1　瞬态动力学问题求解方法 ………………… 221
9.4.2　曲柄滑块机构运动学分析 ………………… 222
9.5　本章小结 ………………… 230
第 10 章　加工过程仿真分析 ………………… 231
10.1　热力学基础知识 ………………… 231
10.1.1　符号与单位 ………………… 232
10.1.2　传热学经典理论回顾 ………………… 232
10.1.3　热传递的方式 ………………… 233
10.1.4　线性与非线性 ………………… 234
10.1.5　边界条件、初始条件 ………………… 234
10.1.6　热分析误差估计 ………………… 234
10.2　焊接过程仿真 ………………… 234
10.2.1　概述 ………………… 234
10.2.2　分析过程 ………………… 237
10.3　铸造过程仿真 ………………… 247
10.3.1　概述 ………………… 247
10.3.2　分析过程 ………………… 247
10.4　本章小结 ………………… 258
第 11 章　装配与复合材料分析 ………………… 259
11.1　非线性问题概述 ………………… 259
11.1.1　非线性分析基础知识 ………………… 259
11.1.2　非线性问题的分类 ………………… 260
11.1.3　非线性分析的收敛问题 ………………… 261
11.2　接触问题实例分析 ………………… 262
11.2.1　接触分析基础知识 ………………… 262
11.2.2　问题描述 ………………… 263
11.2.3　分析求解 ………………… 264
11.3　复合材料分析 ………………… 275
11.3.1　概述 ………………… 275
11.3.2　复合材料梁的分析 ………………… 279
11.4　大变形问题 ………………… 286
11.4.1　问题描述 ………………… 287
11.4.2　分析求解 ………………… 287
11.5　本章小结 ………………… 292
第 12 章　锤击法施工仿真分析 ………………… 293
12.1　ANSYS 显式动态功能模块简介 ………………… 293
12.1.1　显式动态分析的流程 ………………… 293
12.1.2　显式动态分析单元 ………………… 295
12.1.3　显式动态分析建模 ………………… 299
12.1.4　显式动态分析的加载 ………………… 303
12.1.5　显式动态分析求解 ………………… 311
12.1.6　显式动态接触分析 ………………… 314
12.1.7　显式动态分析的材料模型 ………………… 321
12.1.8　显式动态分析中的刚体 ………………… 332
12.1.9　显式动态分析后处理 ………………… 334
12.1.10　跌落测试模块 ………………… 339

12.2 锤击法施工分析实例 ………… 341
12.2.1 问题背景 ………… 341
12.2.2 分析过程 ………… 342
12.3 本章小结 ………… 349
第13章 起重机综合分析 ………… 350
13.1 实例背景 ………… 350
13.2 分析过程 ………… 351
13.2.1 静力学分析 ………… 351
13.2.2 瞬态动力学分析 ………… 365
13.2.3 模态分析 ………… 372
13.3 本章小结 ………… 375

第三篇 土木工程应用篇

第14章 钢筋混凝土基本问题分析 ………… 378
14.1 钢筋混凝土板 ………… 378
14.1.1 问题简述 ………… 378
14.1.2 前处理 ………… 378
14.1.3 加载及求解 ………… 382
14.1.4 后处理 ………… 384
14.2 混凝土开裂 ………… 387
14.2.1 混凝土的裂缝模型 ………… 388
14.2.2 分析中用到的概念 ………… 388
14.2.3 问题描述 ………… 388
14.2.4 前处理 ………… 389
14.2.5 加载和求解 ………… 392
14.2.6 计算结果分析 ………… 394
14.3 本章小结 ………… 397
第15章 钢结构及钢筋混凝土结构分析 ………… 398
15.1 钢结构排架受力分析 ………… 398
15.1.1 钢材特点 ………… 398
15.1.2 问题简述 ………… 398
15.1.3 前处理 ………… 399
15.1.4 加载及求解 ………… 404
15.1.5 后处理 ………… 407
15.2 钢筋混凝土框架结构简单分析 ………… 409
15.2.1 问题简述 ………… 409
15.2.2 前处理 ………… 409
15.2.3 求解 ………… 414
15.2.4 后处理 ………… 415
15.3 本章小结 ………… 417
第16章 膜结构及网壳结构分析 ………… 418
16.1 膜结构 ………… 418
16.1.1 相关知识简介 ………… 418
16.1.2 问题简述 ………… 419
16.1.3 前处理 ………… 419
16.1.4 施加约束及荷载 ………… 421
16.1.5 找形分析 ………… 421
16.1.6 膜结构的前景 ………… 423
16.2 空间网壳结构 ………… 424
16.2.1 问题描述 ………… 424
16.2.2 求解分析过程 ………… 424
16.3 本章小结 ………… 433
第17章 基础工程分析 ………… 434
17.1 房屋刚性独立基础 ………… 434
17.1.1 独立基础 ………… 434
17.1.2 问题简述 ………… 434
17.1.3 前处理 ………… 435
17.1.4 加载及求解 ………… 437
17.1.5 后处理 ………… 439
17.2 考虑摩擦接触的桩基础分析 ………… 441
17.2.1 问题简述 ………… 441
17.2.2 单元及材料属性设定 ………… 442
17.2.3 建模 ………… 443
17.2.4 加载及求解 ………… 449
17.2.5 后处理 ………… 450
17.3 本章小结 ………… 453
第18章 桥梁工程实例分析 ………… 454
18.1 钢桁架桥 ………… 454

18.1.1　问题简述 …… 454
18.1.2　前处理 …… 455
18.1.3　加载及求解 …… 459
18.1.4　一般后处理 …… 460
18.2　大跨度悬索桥 …… 462
18.2.1　悬索桥背景简介 …… 462
18.2.2　问题简述 …… 463
18.2.3　单元及材料参数 …… 464
18.2.4　建模 …… 465
18.2.5　找形分析 …… 468
18.2.6　施工过程模拟 …… 470
18.2.7　悬索桥全结构静力分析 …… 472
18.2.8　悬索桥的地震动力响应 …… 474
18.3　本章小结 …… 475
第 19 章　隧道工程实例分析 …… 476
19.1　山体隧道开挖 …… 476
19.1.1　隧道开挖问题 …… 476
19.1.2　问题简述 …… 476
19.1.3　前处理 …… 477
19.1.4　求解选项及边界条件设置 …… 482
19.1.5　基于单元生死的开挖过程求解 …… 484
19.1.6　后处理 …… 488
19.2　地铁站台的地震响应分析 …… 491
19.2.1　相关知识 …… 491
19.2.2　问题简述 …… 491
19.2.3　前处理 …… 492
19.2.4　加载及求解 …… 497
19.2.5　一般后处理 …… 498
19.2.6　时间历程后处理 …… 500
19.3　本章小结 …… 502
参考文献 …… 503

第  篇

基础知识篇

本篇主要介绍有限元以及 ANSYS 17.0 软件，旨在让读者对 ANSYS 及其相关知识背景有个概念性了解，以便为更深入的学习打下基础。

ANSYS 作为一款有限元分析软件，使用它之前，用户必须了解有限元法的相关知识。虽然实际的有限元求解过程由计算机完成，不需要人工进行计算，但对于有限元的概念必须有所认识。而 ANSYS 软件经历了多版改进，也发生了不少变化。目前市场上各种版本共存，用户有必要对其发展过程有所了解。

根据由浅入深的原则，本篇第 1 章先详细地介绍了 ANSYS 软件的有限元理论基础及其发展史，使读者清晰、完整地了解 ANSYS 系列软件的相关知识背景。

第 2 ~6 章以 GUI 界面操作的方式，系统地介绍了 ANSYS 的各部分功能模块，教会读者面对一个工程如何筹划方案、建立模型、分析计算、结果处理等。

第 7 章则以专题的形式，详尽地介绍了 ANSYS 的程序化设计语言 APDL 的使用方法。

第1章 绪　　论

ANSYS 系列软件是基于有限单元法的大型通用商业有限元软件。本章旨在帮助读者了解 ANSYS 软件的理论背景——有限单元法的发展历程和相关概念等基础知识，以及 ANSYS 17.0 基本操作。

本章学习目标

- 了解有限元法的相关基础知识
- 了解 ANSYS 系列软件的基本操作

1.1 有限单元法概述

FEM，即 Finite Element Method 的缩写，译为有限单元法，在实际应用中往往被称为有限元分析（Finite Element Analysis，FEA，用于通过数值方法解偏微分方程）。FEA 是一种高效、常用的计算方法，它将连续体离散化为若干个有限大小的单元体的集合，以求解连续体的力学问题。

有限单元法是在早期的变分原理的基础上发展起来的，曾被广泛地应用于以拉普拉斯方程和泊松方程所描述的各类物理场中。自 1969 年以来，某些学者陆续在流体力学中运用加权余数法中的迦辽金法（Galerkin）或最小二乘法等同样获得了有限元方程，因而大大拓展了有限单元法的应用范围——可将其应用于以任何微分方程所描述的各类物理场中，而不再要求这类物理场和泛函的极值问题有所联系。

1.1.1 有限元法历史

在有限元分析的发展初期，其基本思想和原理相对较为“简单”和“朴素”，以至于许多学术权威都对其学术价值有所忽视，如国际著名刊物《Journal of Applied Mechanics》有些年都拒绝刊登有关有限元分析的文章。然而现在，有限元分析已经成为数值计算的主流，不但国际上存在数种通用有限元分析软件（如 ANSYS 等），而且涉及有限元分析的杂志也有几十种之多。

国际上早在 20 世纪 50 年代末、60 年代初就投入大量的人力、物力开发具有强大功能的有限元分析程序。其中最为著名的是由美国国家宇航局（NASA）在 1965 年委托美国计算科学公司和贝尔航空系统公司开发的 NASTRAN 有限元分析系统。该系统发展至今已有几

十个版本，是目前世界上规模最大、功能最强的有限元分析系统之一。

现在，世界各地的研究机构和大学也发展了一批规模较小但使用灵活、价格较低的专用或通用有限元分析软件，主要有德国的 ASKA、英国的 PAFEC、法国的 SYSTUS、美国的 ABAQUS、ADINA、ANSYS、BERSAFE、BOSOR、COSMOS、ELAS、MARC 和 STARDYNE 等公司的产品。

1.1.2 有限单元法的基本概念

有限单元法，也叫有限元法，其基本思想是将一个结构或连续体的求解域离散为若干个子域（单元），并通过它们边界上的节点相互连接成为组合体。

有限元法用每一个单元内所假设的近似函数来分片地表示全求解域内待求的未知场变量，而每个单元内的近似函数由未知函数或其导数在单元各个节点上的数值和相应的插值函数来表示。由于在连接相邻单元的节点上，场函数应具有相同的数值，因而将它们用作数值求解的基本未知量。这样一来，原来求解场函数的无穷自由度问题便转换为求解场函数节点值的有限自由度问题。

有限元法是通过和原问题数学模型（基本方程、边界条件）等效的变分原理或加权余量法，建立求解基本未知量（场函数的节点值）的代数方程组或微分方程组。此方程组称为有限元求解方程，并表示成规范的矩阵形式。接着用数值方法求解此方程，从而得到问题的解答。

结构离散（有限元建模）的内容包括网格划分（即把结构按一定规则分割成有限单元）和边界处理（即把作用于结构边界上的约束和载荷处理为节点约束和节点载荷）。其中要求离散结构必须与原始结构保形（单元的几何特性）；一个单元内的物理特性必须相同（单元的物理特性）。

单元即原始结构离散后，满足一定几何特性和物理特性的最小结构域。节点即单元与单元间的连接点。节点力即单元与单元间通过节点的相互作用力。节点载荷即作用于节点上的外载。

插值函数（或位移函数）是用表示单元内物理量变化（如位移或位移场）的近似函数。由于该近似函数常由单元节点物理量值插值构成，故称为插值函数。如果单元内物理量为位移，则该函数称为位移函数。

选择位移函数的一般原则是：位移函数在单元节点的值应等于节点位移（即单元内部是连续的）；所选位移函数必须保证有限元的解收敛于真实解。要注意的是，为了便于微积分运算，位移函数一般采用多项式形式，在单元内选取适当阶次的多项式可得到与真实解接近的近似解。

1.2 ANSYS 17.0 基本操作

ANSYS 是由美国安世亚太公司研发的一款大型通用有限元分析软件，作为现代产品设计中的高级 CAE 工具之一，它融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体，能与多数 CAD 软件接口，能够实现数据的共享和交换。

1.2.1 ANSYS 17.0 的启动与退出

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，如图 1-1 所示。



图 1-1　ANSYS 17.0 启动画面

（2）在稍后弹出的 17.0:ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中，用户可以方便地管理自己的项目，如图 1-2 所示。例如，在 Working Directory 框中输入工作目录，在 Job Name 框中输入项目名称。

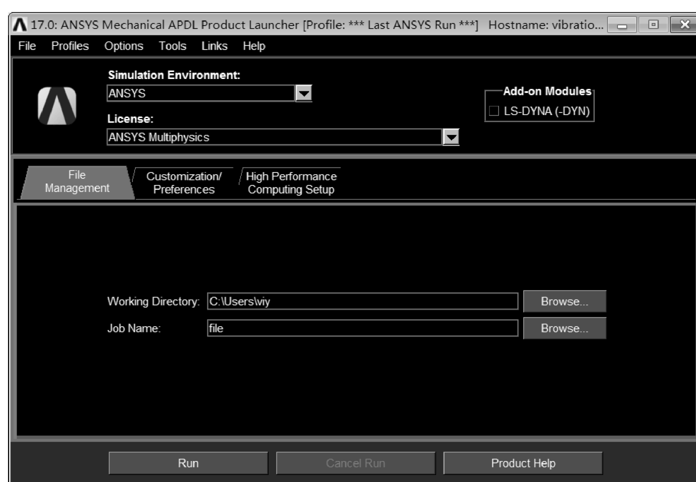


图 1-2　17.0:ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口

1.2.2 ANSYS 17.0 操作界面

1. ANSYS 17.0 GUI 界面

在 17.0:ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中单击 Run 按钮，即可进入 ANSYS 17.0 的 GUI 界面，如图 1-3 所示。

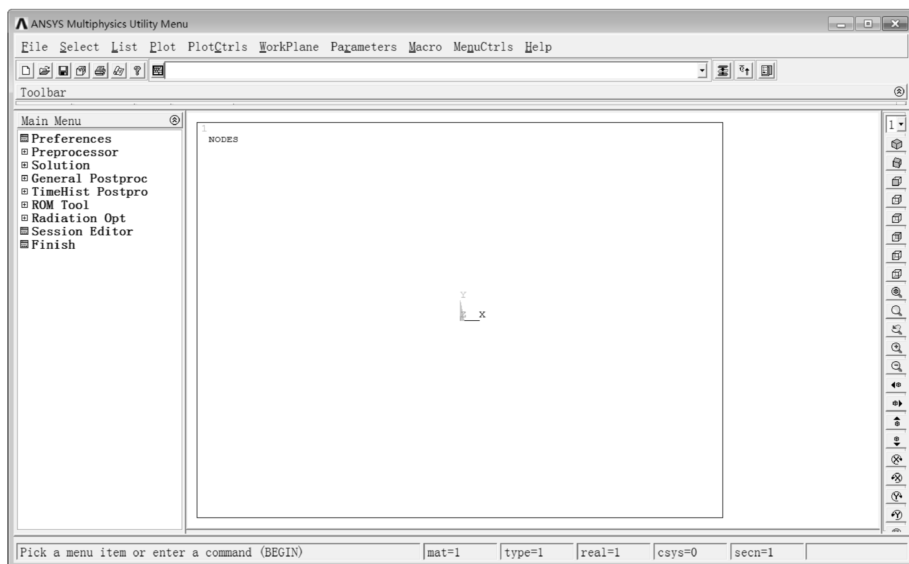


图 1-3　ANSYS 17.0 GUI 界面

该界面主要由 Main Menu（主菜单）、工作区、通用菜单、快捷工具栏等几部分组成，下面分别介绍。

（1）Main Menu（主菜单）：定义单元、建立模型、求解、后处理等命令都可以在这里找到，如图 1-4 所示。

（2）工作区：建立的模型、分析完成后的结果、求解过程的监视等都将呈现在这里，如图 1-5 所示。

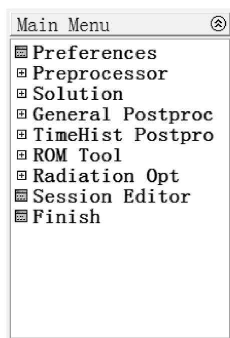


图 1-4　主菜单

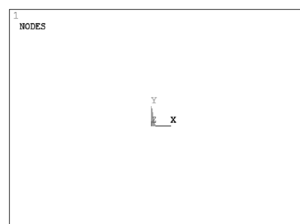


图 1-5　工作区

（3）通用菜单（Utility Menu）：其中包含文件管理、项目选择、工作区显示的控制、参数的定义、工作平面、帮助等功能，如图 1-6 所示。通用菜单中的各项功能在下文的介绍中将经常遇到，在此不多赘述。



图 1-6　通用菜单

希望读者能够多加注意的是 ANSYS 17.0 的帮助功能。ANSYS 17.0 的帮助系统功能十分强大，用户可以从中找到有关 ANSYS 17.0 的任何理论知识、操作方法等，如图 1-7 所示。

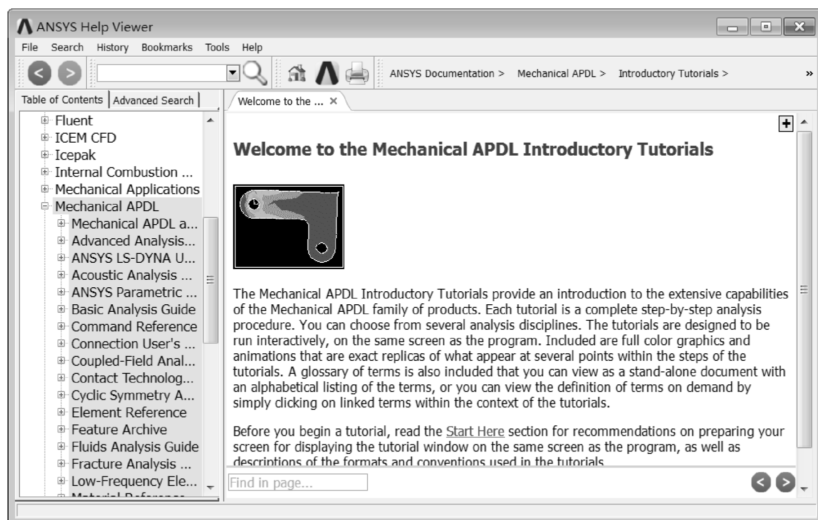


图 1-7　ANSYS 17.0 帮助系统

（4）快捷工具栏：用于快速执行系统功能，如图 1-8 所示。在此要重点介绍的是命令输入框，在其中输入 APDL 命令，可快速进行操作。



图 1-8　快捷工具栏

2. Mechanical APDL 17.0 Output Window

在 GUI 界面打开的同时，系统还将打开 Mechanical APDL 17.0 Output Window 窗口，如图 1-9 所示。

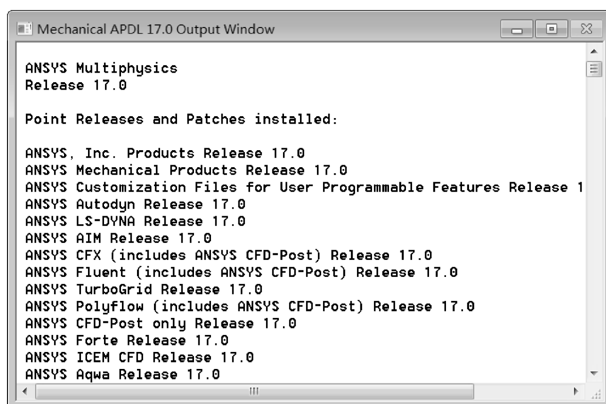


图 1-9　Mechanical APDL 17.0 Output Window

该窗口中显示了 ANSYS 项目的信息，可以从中查看定义单元、材料参数、分析过程中的各种警告与错误提示，以及 * GET 命令提取的数据等。

1.2.3 ANSYS 17.0 文件管理

ANSYS 软件广泛应用文件来存储和恢复数据，特别是在求解分析时。这些文件被命名为 filename. ext，其中主文件名为默认的作业名，作业名是进入 ANSYS 程序后用户指定的文件名（通过/FILNAME 命令或在 GUI 界面中选择 File > Change Jobname 命令来指定），如果没有指定，默认为 FILE（或 file）；ext 为扩展名，由 2 ~4 个字符组成，用于表明文件类型。

文件名（主文件名和扩展名）在某些系统中可能是小写。例如，如果主文件名是“bolt”，在一个 ANSYS 问题分析结束时可能得到如下文件。

- bolt. db：数据库文件。
- bolt. emat：单元矩阵文件。
- bolt. err：错误和警告消息文件。
- bolt. log：命令输入历史文件。
- bolt. rst：结果文件。

在 ANSYS 运行结束前产生，然后又在某一时刻被删除的文件称为临时文件。在运行结束后仍然存在的文件叫做永久性文件。

贯穿 ANSYS 文档组的输出文件（Jobname. OUT），也是常被提及的文件之一。如果运行于 UNIX 系统，仅想把其输出送到屏幕，从启动器中选择 Iteractive，在弹出的 Selected Product 对话框中选择 Screen only，输出“文件”将是 ANSYS 输出窗口；如果选择 Screen and file，那么在当前的工作目录中，将会产生一个名为 Jobname. OUT 的真实文件。

ANSYS 不会立即把输出文件送到输出窗口中，而是等到输入/输出缓冲器被填满或刷新之后。错误和警告将刷新输入/输出缓冲器，用户也可以发出某些命令（如/OUTPUT、NLIST 或 KLIST）来使输入/输出缓冲器强行刷新。

根据文件如何被使用，程序相应地用文本格式（ACSII 码）或二进制格式写入文件。例如，ERR 和 LOG 文件是文本文件，而 DB、EMAT 和 RST 文件是二进制文件。通常，需要进行读（及编辑）的文件是用文本格式写入的，其他文件是用二进制格式写入的。

二进制文件可以是外部文件或内部文件。外部二进制文件能在不同计算机之间相互传送；内部二进制文件仅在写该文件的计算机上调用，不能传送。在默认情况下，所有 ANSYS 保存的二进制文件都是外部文件。可通过下列两种方法之一将其改为内部文件。

- 使用/FTYPE 命令。
- 在 GUI 界面中选择 Utility Menu > File > ANSYS File Options 命令。

不能将数据库文件（Jobname. DB）或结果文件（Jobname. Rxx）改为内部文件。

下面是使用二进制文件的一些技巧：

- 如果不打算在不同计算机系统间传送文件，把所有的二进制文件指明为内部文件可节省 CPU 的运行时间。因为一些系统写外部类型的二进制文件要比写内部类型的二进制文件花费更多的时间。
- 当通过 FTP（文件传输协议）传输文件时，在传输前必须设置 BINARY 选项。
- 即使数据仅从文件中读取，大多数 ANSYS 二进制文件也必须使写许可可用。然而，

数据库文件（file. DB）和结果文件（file. RST、file. RTH 等）只能为只读形式。当保存一个只读文件 file. DB 时，已有的只读文件将被保存为 file. DBB。但是，不能再次保存只读文件 file. DB，因为它将试图覆盖 file. DBB，这一点是 ANSYS 所不允许的。

- 高级版本的 ANSYS 二进制文件不兼容低版本二进制文件。例如，不能将 ANSYS 17.0 产生的二进制文件在 ANSYS 13.0 或更低版本上运行，否则可能引起严重的操作问题。向上兼容的文件见表 1-1。

表 1-1　二进制文件的兼容性

标识符	类型	兼容性	内　　容
BDB	Binary	–	最优设计的数据库文件（OPKEEP）
BFIN	Text	–	由 BF 命令写入的体积力插值文件（BFINT）
BRFL	Binary	–	最优设计的 FLOTRAN 结果文件（OPKEEP）
BRMG	Binary	–	最优设计的磁场结果文件（OPKEEP）
BRST	Binary	–	最优设计的结构分析结果文件（OPKEEP）
BRTH	Binary	–	最优设计的温度结果文件（OPKEEP）
CBDO	Text	–	由 D 命令写入的自由度插值文件（CBDOF）
CDB	Text	Y	文本格式数据库文件（CDWRITE）
CMAP	Text	–	彩色映像文件
CMD	Text	Y	由 * CFWRITE 写入的命令文件
DB	Binary	Y	数据库文件（SAVE，/EXIT）
DBE	Binary	–	批处理模式中因 VMESH 失败产生的数据库文件
DBG	Text	–	FLOTRAN“调试”文件（包括求解信息）
DSUB	Binary	Y	使用结束的超单元 DOF 求解文件
ELEM	Text	Y	单元定义文件（EWRITE）
EMAT	Binary	Y	单元矩阵文件
ERR	Text	–	错误及警告信息文件
ESAV	Binary	Y	单元数据存储文件（注：ANSYS 非线性分析产生的 ESAV 文件可能向上不兼容）
FATG	Text	–	疲劳数据文件（FTWRITE）
FULL	Binary	–	组集的整体刚度矩阵和质量矩阵文件
GRPH	Text	Y	中性图形文件
IGES	Text	Y	由 ANSYS 实体模型产生的 IGES 文件（IGES）
LGW	Text	Y	数据库命令记录文件（LGWRITE）
Lnn	Binary	Y	载荷工况文件（LCWRITE）
LOG	Text	Y	命令输入历程文件
LOOP	Text	–	优化循环文件
MCOM	Text	Y	谱分析中的模式组合命令文件（MCOMB）
MODE	Binary	Y	模态矩阵文件（模态和屈曲分析）
MP	Text	Y	材料特性定义文件（MPWRITE）
NODE	Text	Y	节点定义文件（NWRITE）
OPO	Text	–	最终优化循环的 ANSYS 输出文件
OPT	Text	–	优化的数据文件
OSAV	Binary	–	最终优化循环的 ESAV 文件副本

（续）

标识符	类型	兼容性	内　　容
OUT	Text	–	ANSYS 输出文件
PARM	Text	Y	参数定义文件（PARSAVE）
PFL	Text	–	FLOTRAN 打印输出文件
PSD	Binary	–	PSD 文件（模态协方差矩阵等）
RDF	Text	–	FLOTRAN 的残留文件（FLDATA，OUTP）
RDSP	Binary	–	约化位移文件
REDM	Binary	–	约化结构矩阵文件
RFL	Binary	Y	FLOTRAN 结果文件
RFRQ	Binary	–	约化复合位移文件
RMG	Binary	Y	磁场分析的结果文件
RST	Binary	Y	结构和耦合场分析的结果文件
RSW	Text	–	FLOTRAN“管壁”结果文件
RTH	Binary	Y	温度场分析的结果文件
RUN	Text	–	FLOTRAN 运行的数据文件
SELD	Binary	Y	生成结束的超单元载荷矢量数据文件
Snn	Text	Y	载荷步文件（nn 为载荷步号）（LSWRITE）
SORD	Text	–	使用结束的超单元名及编号文件
STAT	Text	–	ANSYS 批处理运行状态文件
SUB	Binary	Y	在传输阶段产生的超单元矩阵文件
TB	Text	Y	超弹性材料常数文件（ * MOONEY）
TRI	Binary	–	三角化刚度矩阵文件
USUB	Binary	Y	为超单元扩展传递而输入的重命名 DSUB 文件
XBC	Text	–	FLOTRAN 边界条件数据文件
XGM	Text	–	FLOTRAN 几何形状数据文件
XIC	Text	–	FLOTRAN 初始条件数据文件

在许多场合下，ANSYS 程序需要读取自己的文件，这个文件可能是 ANSYS 命令的文本文件或者 ANSYS 数据的二进制文件。

读取文本文件的命令及 GUI 界面操作见表 1-2。

表 1-2　读取文本文件

命令	GUI 菜单路径	用　　途
* USE	Utility Menu > Macro > Execute Data Block	读取宏
PARRES	Utility Menu > Parameters > Restore parameters	读取参数文件（Jobname. PARM）
EREAD	Main Menu > Preprocessor > Creat > elements > Read Elem File	读取单元文件（Jobname. ELEM）
NREAD	Main Menu > Preprocessor > Creat > Nodes > Read Node File	读取节点文件（Jobname. NODE）
MPREAD	Main Menu > Preprocessor > Loads > Other > Change Mat Props > Read from File	读取材料特性文件（Jobname. MP）
	Main Menu > Preprocessor > Material Props > Read from File	
	Main Menu > Solution > Other > Change MatProps > Read from File	

读取二进制文件的命令及 GUI 界面操作见表 1-3。

表 1-3 读取二进制文件

命令	GUI 菜单路径	用 途
RESUME	Utility Menu > File > Resume from	读取数据库文件（Jobname. DB）
	Utility Menu > File > Resumejobname. DB	
SET	Utility Menu > List > Results > Load Step Summary	读取结果文件（Jobname. RST、Jobname. RTH、Jobname. RMG、Jobname. RFL）
OPRESU	Main Menu > Design Opt > Resume	读取优化数据文件（Jobname. OPT）

1. 2. 4 ANSYS 17. 0 有限元分析流程

ANSYS 有限元软件包是一种多用途的有限元法计算机设计程序，可以用来求解结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题，广泛应用于航空航天、汽车工业、生物医学、桥梁、建筑、电子产品、重型机械、微机电系统、运动器械等领域。

该软件主要包括 3 部分：前处理模块、分析计算模块和后处理模块。

前处理模块提供了一种强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型。

分析计算模块包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析等功能子模块，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力。

后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示（可看到结构内部）等图形方式显示出来，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

与 ANSYS 软件架构对应的是，典型的 ANSYS 有限元分析流程分为如下 3 个阶段。

（1）建立有限元模型（前处理器，Preprocessor）。

① 创建几何模型（导入或在 ANSYS 中建立）。

② 定义单元、材料属性。

③ 划分网格。

（2）加载与求解（求解器，Solution Processor）。

① 施加载荷与其他边界条件。

② 求解。

（3）查看与处理结果（后处理器，Post Processor）。

① 查看分析结果。

② 导出结果数据。

③ 判断结果的合理性。

1.3 本章小结



本章为读者介绍了有限单元法的起源和发展，以及由此而产生的通用有限元分析工具——ANSYS。

ANSYS 具有强大的结构、热力学、流体、电磁等领域的分析功能。结构静力分析用来求解外载荷引起的位移、应力和力。结构动力学分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。结构非线性导致结构或部件的响应随外载荷不成比例变化。ANSYS 可以分析大型三维柔体运动。ANSYS 可处理热传递的 3 种基本类型：传导、对流和辐射热。

第 2 章　建 立 模 型

有限元分析的第 1 步就是建立模型。建立模型时，可以建立几何模型或者直接建立有限元模型。本章将对两种建模的思路进行详细介绍，并给出由其他 CAD 软件导入几何模型的方法。

本章学习目标

- 了解 ANSYS 量纲及坐标系问题
- 掌握 ANSYS 多种实体建立模型的方法
- 掌握 ANSYS 直接建立有限元模型的方法
- 掌握 ANSYS 导入模型的方法

2.1　建模前知识准备

在开始建模前，用户有必要了解 ANSYS 中的量纲和坐标系问题。

虽然 ANSYS 本身并不要求给出单位，但用户在进行分析前需要做的一项重要工作就是统一单位。

建立模型时，用户首先要考虑在何种坐标系下定义模型的坐标参数更方便。

2.1.1 量纲问题

一般的通用有限元软件不直接给出分析中使用的物理量的单位，ANSYS 中的单位制只是一个标识，不具有任何单位换算功能。用户所要做的统一单位工作不限于使用某一固定单位制，关键在于只要是“统一”的单位制即可。

用户在分析过程中不可避免地会用到许多物理量，如长度单位 m、mm，时间单位 s、ms，质量单位 g、kg，力的单位 N、kN 等。如果所有的单位均采用国际单位制的主单位，那么所有的计算结果也均为国际单位制，并不难以处理。但在实际工程问题中，习惯单位通常与国际单位制千差万别。例如，工程实用的长度单位通常是 mm 而非主单位 m，时间单位可能是 d（天）而非主单位 s，压力单位通常是 MPa 而非主单位 Pa 等。因此，量纲换算是一项必要的工作。

1. 基本物理量与导出物理量

（1）基本物理量及其量纲如下。

- 长度：L。

- 质量：m。
- 时间：t。
- 温度：T。

（2）导出物理量及其量纲如下。

- 速度：$v=L/t$。
- 加速度：$a=L/t^2$。
- 面积：$A=L^2$。
- 体积：$V=L^3$。
- 密度：$\rho=m/L^3$。
- 力：$f=m\cdot a=m\cdot L/t^2$。
- 力矩、能量、热量、焓等：$e=f\cdot L=m\cdot L^2/t^2$。
- 压力、应力、弹性模量等：$p=f/A=m/(t^2\cdot L)$。
- 热流量、功率等：$\psi=e/t=m\cdot L^2/t^3$。
- 导热率：$k=\psi/(L\cdot T)=m\cdot L/(t^3\cdot T)$。
- 比热容：$c=e/(m\cdot T)=L^2/(t^2\cdot T)$。
- 热交换系数：$Cv=e/(L^2\cdot T\cdot t)=m/(t^3\cdot T)$。
- 粘性系数：$Kv=p\cdot t=m/(t\cdot L)$。
- 熵：$S=e/T=m\cdot l^2/(t^2\cdot L)$。
- 质量熵、比熵：$s=S/m=l^2/(t^2\cdot L)$。

确定了要选用的单位制，确定基本物理量后，即可推导其余物理量。

2. mm－t－s－K 单位制

（1）基本物理量的单位如下。

- 长度：L＝mm。
- 质量：m＝t。
- 时间：t＝s。
- 温度：T＝K。

（2）导出物理量的单位如下。

- 速度：$v=L/t=mm/s$。
- 加速度：$a=L/t^2=mm/s^2$。
- 面积：$A=L^2=mm^2$。
- 体积：$V=L^3=mm^3$。
- 密度：$\rho=m/L^3=t/mm^3$。
- 力：$f=m\cdot a=m\cdot L/t^2=N$。
- 力矩、能量、热量、焓等：$e=f\cdot L=m\cdot L^2/t^2=mJ$。
- 压力、应力、弹性模量等：$p=f/A=m/(t^2\cdot L)=MPa$。
- 热流量、功率等：$\psi=e/t=m\cdot L^2/t^3=mW$。
- 导热率：$k=\psi/(L\cdot T)=m\cdot L/(t^3\cdot T)=kg\cdot m/(s^3\cdot K)$。
- 比热容：$c=e/(m\cdot T)=L^2/(t^2\cdot T)=mm^2/(s^2\cdot K)$。
- 热交换系数：$Cv=e/(L^2\cdot T\cdot t)=m/(t^3\cdot T)=t/(s^3\cdot K)$。

- 黏性系数：$Kv=p\cdot t=m/(t\cdot L)=t/(s\cdot mm)$。
- 熵：$S=e/T=m\cdot L^2/(t^2\cdot T)=10^{-3}\ kg\cdot m^2/(s^2\cdot K)$。
- 质量熵、比熵：$s=S/m=l^2/(t^2\cdot T)=10^{-6}m^2/(s^2\cdot K)$。

3. mm－kg－s－K 单位制

（1）基本物理量的单位如下。

- 长度：$L=mm$。
- 质量：$m=kg$。
- 时间：$t=s$。
- 温度：$T=K$。

（2）导出物理量的单位如下。

- 速度：$v=L/t=mm/s$。
- 加速度：$a=L/t^2=mm/s^2$。
- 面积：$A=L^2=mm^2$。
- 体积：$V=L^3=mm^3$。
- 密度：$\rho=m/L^3=kg/mm^3$。
- 力：$f=m\cdot a=m\cdot L/t^2=mN$。
- 力矩、能量、热量、焓等：$e=f\cdot L=m\cdot L^2/t^2=\mu J$。
- 压力、应力、弹性模量等：$p=f/A=m/(t^2\cdot L)=kPa$。
- 热流量、功率等：$\psi=e/t=m\cdot L^2/t^3=\mu W$。
- 导热率：$k=\psi/(L\cdot T)=m\cdot L/(t^3\cdot T)=10^{-3}kg\cdot m/(s^3\cdot K)$。
- 比热容：$c=e/(m\cdot T)=L^2/(t^2\cdot T)=mm^2/(s^2\cdot K)$。
- 热交换系数：$Cv=e/(L^2\cdot T\cdot t)=m/(t^3\cdot T)=kg/(s^3\cdot K)$。
- 黏性系数：$Kv=p\cdot t=m/(t\cdot L)=kg/(s\cdot mm)$。
- 熵：$S=e/T=m\cdot L^2/(t^2\cdot T)=10^{-6}\ kg\cdot m^2/(s^2\cdot K)$。
- 质量熵、比熵：$s=S/m=l^2/(t^2\cdot T)=10^{-6}m^2/(s^2\cdot K)$。

注意：选择量纲时用户应考虑以下问题。

- 确定分析中使用的物理量的数量级，避免使数据出现过大或过小的情况。
- 同一个问题中所有物理量要保持一致，计算过程中尽量不要随意转换。
- 一般而言，先确定基本物理量，再确定导出物理量；但在实际情况下，用户也可以根据需要先确定导出物理量，再反推基本物理量。

2.1.2 坐标系问题

ANSYS 中可以使用多种坐标系，这些坐标系有着不同的使用场合与用法。注意：ANSYS的坐标系均为右手正交系。

1. 坐标系的种类

ANSYS 中可以使用的坐标系主要有以下几种。

（1）全局坐标系：分为 4 种，分别介绍如下。

- CS，0：全局直角坐标系，也就是全局笛卡儿坐标系。

- CS，1：全局柱坐标系，以 Z 方向为轴向。
- CS，2：全局球坐标系。
- CS，5：全局柱坐标系，以 Y 方向为轴向。

如图 2-1 所示，即为 4 种不同的全局坐标系。

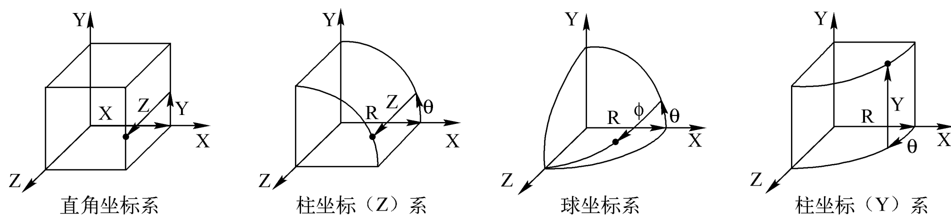


图 2-1　全局坐标系

不同的坐标系中，常数代表的面如图 2-2 所示。

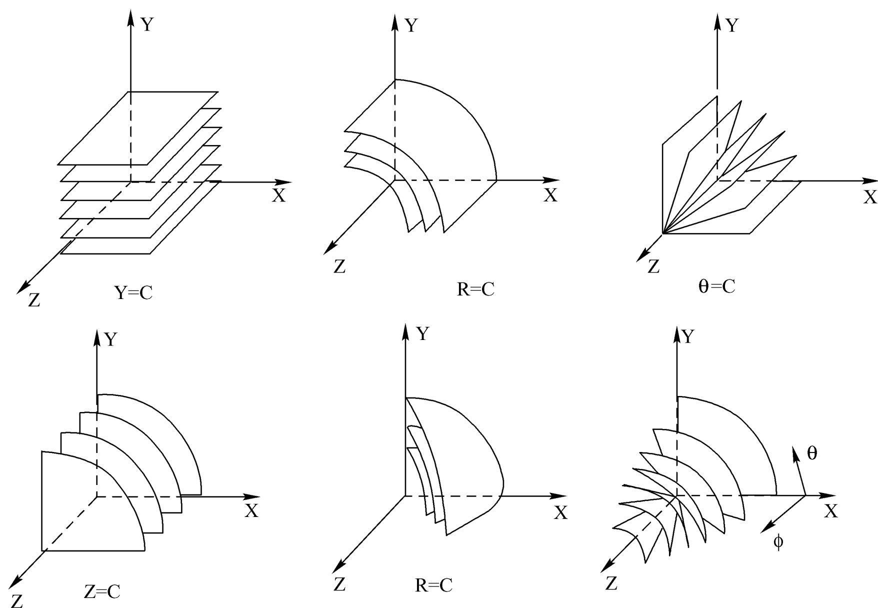


图 2-2　不同坐标系下的常数面

（2）局部坐标系：由用户定义，激活的坐标系是分析中特定时间的参考系。当创建了一个新的坐标系，则新的坐标系变为当前激活坐标系，如图 2-3 所示。

为了方便使用，用户甚至可以定义环形的局部坐标系，如图 2-4 所示。

（3）节点坐标系：每一个节点都有一个附于其上的坐标系，称之为节点坐标系。节点坐标系默认为笛卡儿坐标系且与全局坐标系平行。

节点坐标系可以进行旋转，如图 2-5 所示。

（4）单元坐标系：用于确定材料属性的方向，后处理中提取梁单元、壳单元的膜力等。单元坐标系的朝向参见各单元的帮助文件。

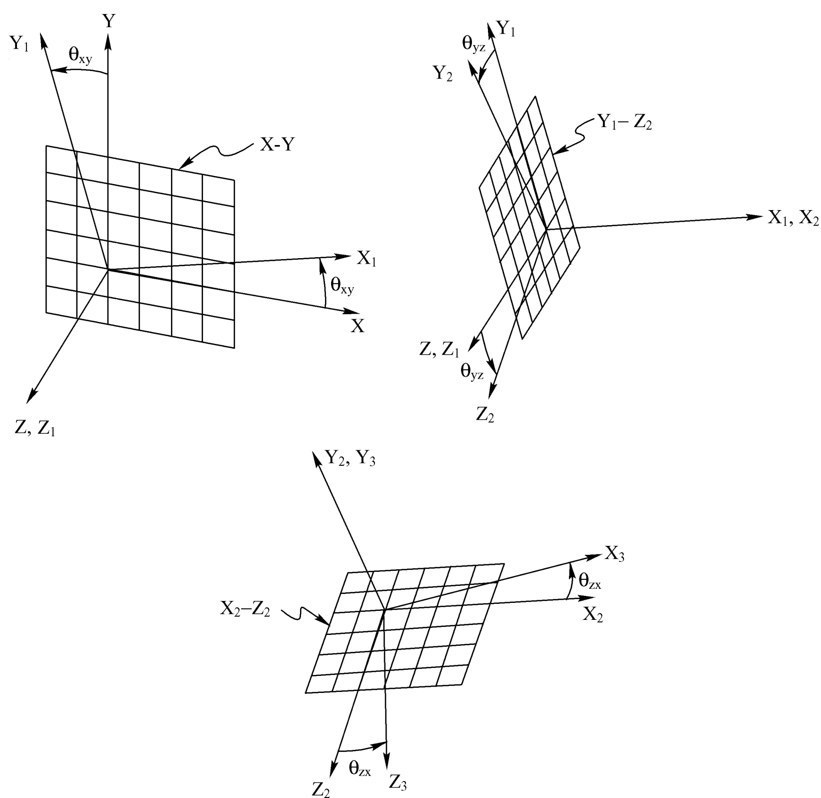


图 2-3　由全局坐标系旋转得到的局部坐标系

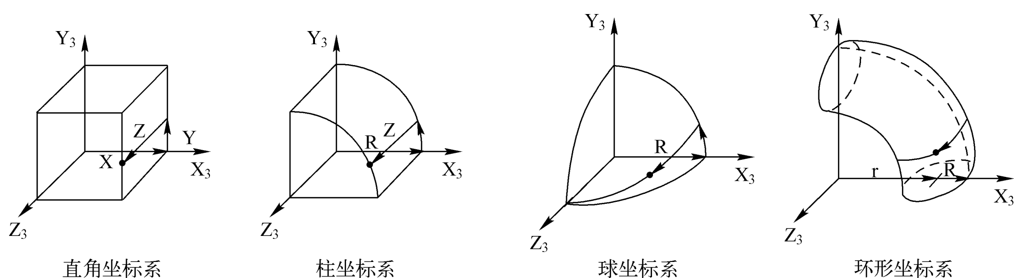


图 2-4　不同类型的局部坐标系

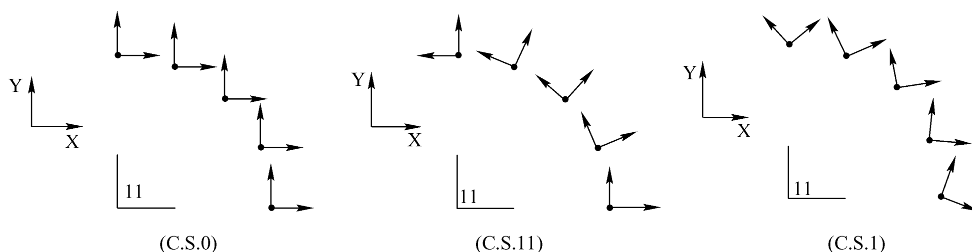


图 2-5　旋转节点坐标系

（5）结果坐标系：通用后处理器的结果是用结果坐标系表达的。无论节点和单元坐标如何设定，结果坐标系都默认为直角坐标系。

（6）显示坐标系：在屏幕上显示定义的新基准，建议用户不要随意修改。使用柱坐标系显示圆弧时将显示成直线，可能引起理解上的混乱。

2. 坐标系的切换与设置

（1）在 GUI 界面中选择如下命令。

- Main Menu > General Postproc > Surface Operations > Create Surface > Sphere > At Node。
- Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cartesian。
- Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cylindrical。
- Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Spherical。
- Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Specified Coord Sys。
- Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Working Plane。
- Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Global Origin。

在弹出的如图 2-6 所示 Change Active CS to Specified CS 对话框中，输入坐标系编号，单击 OK 按钮，即可完成全局坐标系的切换。

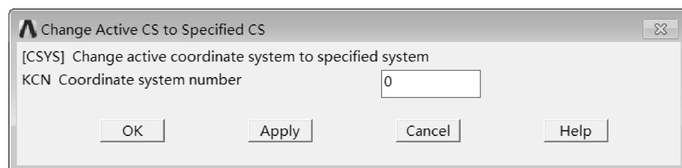


图 2-6　Change Active CS to Specified CS 对话框

（2）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > At Specified Loc 命令，在弹出的如图 2-7 所示 Create Local CS at Specified Location 对话框中进行相应的设置，然后单击 OK 按钮，即可完成局部坐标系的切换。

（3）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > By 3 Nodes 命令，按照提示拾取 3 个节点，在弹出的如图 2-8 所示 Create CS By 3 Nodes 对话框中设置坐标系编号与类型，然后单击 OK 按钮，即可完成节点坐标系的设置。

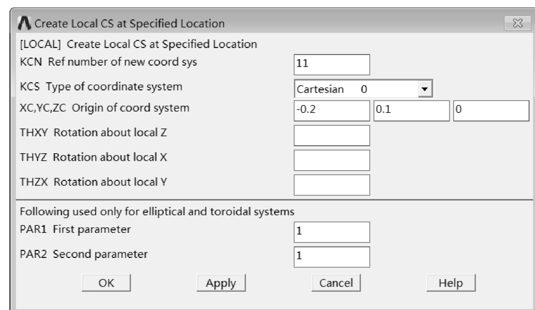


图 2-7　Create Local CS at Specified Location 对话框

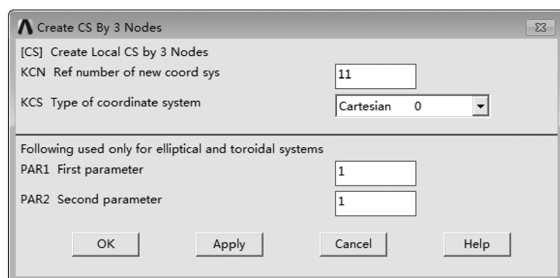


图 2-8　Create CS By 3 Nodes 对话框

（4）用户可以在 GUI 界面中选择如下命令设置显示坐标系。

- Utility Menu > WorkPlane > Change Display CS to > Global Cartesian
- Utility Menu > WorkPlane > Change Display CS to > Global Cylindrical

- Utility Menu > WorkPlane > Change Display CS to > Global Spherical
- Utility Menu > WorkPlane > Change Display CS to > Specified Coord Sys

但是本书强烈建议，初学者不要随意设置显示坐标系。例如，将显示坐标系改为柱坐标系，圆柱面会显示成平面，对于刚接触 ANSYS 的用户很可能出现各种难以处理、不知所云的结果。

3. 工作平面

工作平面（Working Plane）是创建几何模型的参考平面（*X*－*Y* 平面），在前处理器中用于建立模型，在后处理器中用于观察截面结果。

工作平面是一个无限平面，有原点、二维坐标系，同一时间只能定义一个工作平面，与坐标系是独立的。默认的工作平面是笛卡尔坐标系下的 *X*－*Y* 平面。

2.2 自底向上建模

自底向上建模是最基本的建模方法，也是最容易掌握的所谓“传统”方法。

自底向上建立实体模型时，首先要定义关键点，再利用它们定义较高级的图元（线、面或体），这样由点到线，由线到面，由面到体，由低级到高级。

下面以一异形柱体的建模为例介绍自底向上建模方法。

2.2.1 模型尺寸及相关参数

柱体如图 2-9 所示。

其中，柱高 100，底面上共 8 个角点，坐标依次为点 1（0，0）；点 2（50，30）；点 3（100，0）；点 4（70，50）；点 5（100，100）；点 6（50，70）；点 7（0，100）；点 8（30，50）。

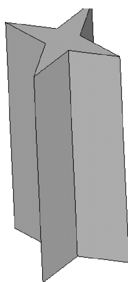


图 2-9 柱体

2.2.2 建模过程

（1）创建关键点。

① 选择 Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，如图 2-10 所示。

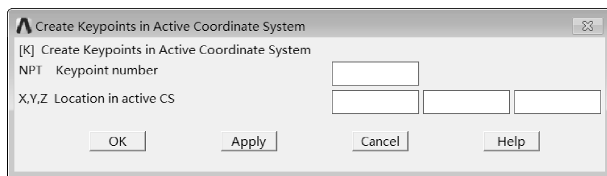


图 2-10 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

② 在 NPT Keypoint number 框中输入点的编号，在 X，Y，Z Location in active CS 框中依次输入 X、Y、Z 坐标值。以点 1（0，0）的生成为例，在 NPT keypoint number 框中输入 1，在 X，Y，Z Location in active CS 框中依次输入 0、0。Z 值不存在，省略即可。

③ 单击 Apply 按钮，生成一个关键点。再依据 2.2.1 节中给出的坐标点值生成其余关键点，全部生成后单击 OK 按钮，结果如图 2-11 所示。

此时可通过路径 Utility Menu > List > Keypoints > Coordinate only 列出各点坐标值。

（2）由关键点生成线。

① 路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord。

② 依次拾取关键点 1 ~8，连接各点组成边线，然后单击 OK 按钮，生成直线，如图 2-12 所示。

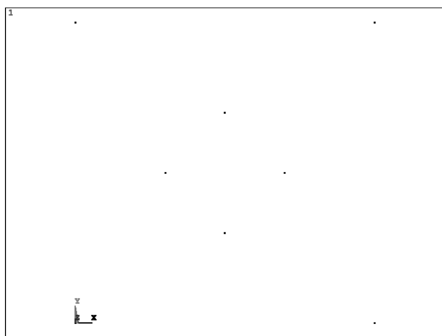


图 2-11　生成关键点

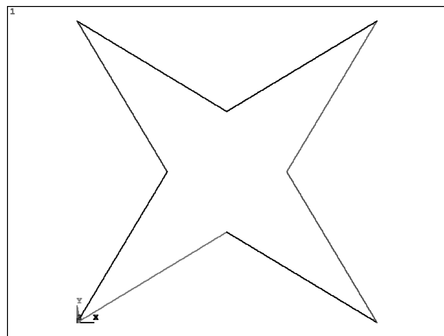


图 2-12　由点生成直线

（3）由线生成面。

① 路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines。

② 逆时针依次拾取所有直线，单击 OK 按钮，生成面，如图 2-13 所示。

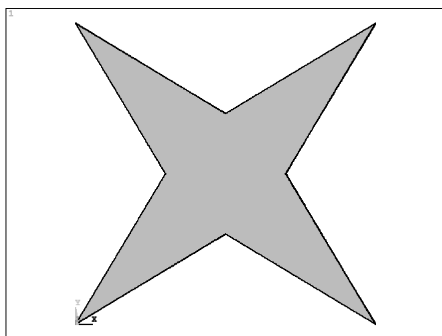


图 2-13　由线生成面

（4）由面生成体。

本例通过拉伸操作，由面拉伸成体。

① 路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > By XYZ Offset。

② 拾取面单元，单击 OK 按钮；在 DX，DY，DZ Offsets for extrusion 框中分别输入 0、0、100，如图 2-14 所示；单击 OK 按钮，生成体，如图 2-15 所示。

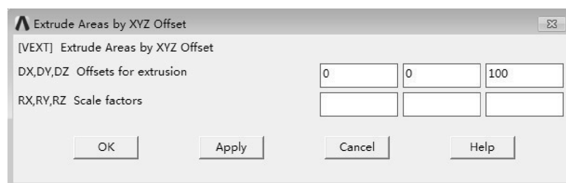


图 2-14　拉伸设置

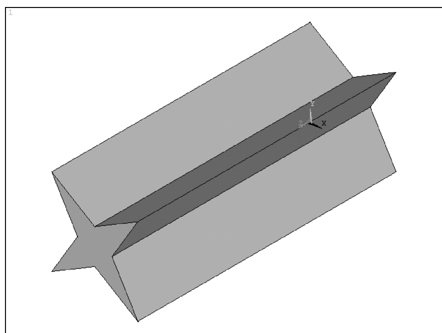


图 2-15　生成体

（5）保存结果 SAVE_DB，几何模型建立完毕。

2.3 自顶向下建模

不同情况应用不同建模思路，可以提高效率，方便操作。下面给出一个带孔矩形板自顶向下建模的例子。

2.3.1 相关参数

板厚度为 25 mm，长度为 200 mm，宽度为 150 mm，圆孔半径为 10 mm，分布在板的四角距边缘 10 mm。

2.3.2 建模过程

（1）创建矩形板。

① 选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By Dimensions 命令，在弹出的对话框中设置参数如下。

- X1，X2 = 0，200。
- Y1，Y2 = 0，150。
- Z1，Z2 = 0，25。

② 单击 OK 按钮，生成图 2-16 所示长方体。

（2）创建圆柱体。

① 选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > Solid Cylinder 命令，在弹出的对话框中设置参数 WP X = 20，WP Y = 20，Radius = 10，Depth = 25，然后单击 OK 按钮，生成第一个圆柱体。

② 以同样的方法，分别设置参数如下。

- WP X = 180，WP Y = 20，Radius = 10，Depth = 25。
- WP X = 180，WP Y = 130，Radius = 10，Depth = 25。
- WP X = 20，WP Y = 130，Radius = 10，Depth = 25。

生成其余 3 个圆柱体，得到图形如图 2-17 所示。

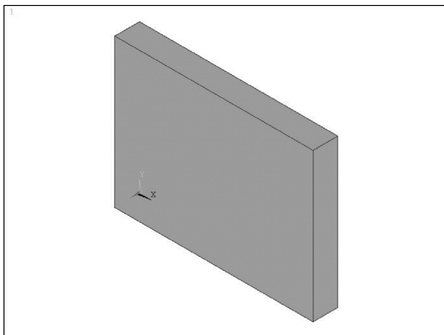


图 2-16 长方体

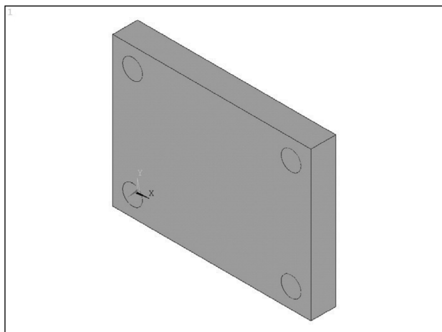


图 2-17 板中生成圆柱体

（3）从长方体中减去圆柱体（此处运用布尔运算）。

① 选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Volumes 命令。

② 首先拾取长方体，选择体单元 1，然后单击 OK 按钮。

③ 拾取要减去的圆柱体，单击 OK 按钮，生成带孔的板，如图 2-18 所示，平面视图如图 2-19 所示。

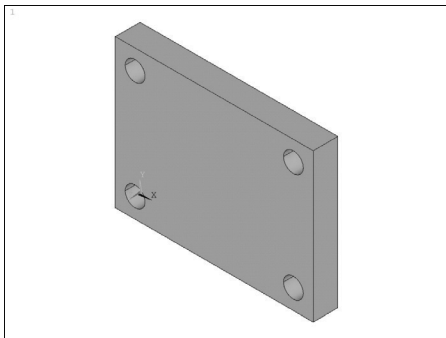


图 2-18　生成带孔板件

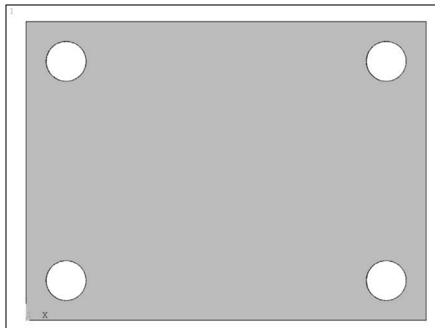


图 2-19　板件平面视图

（4）保存结果 SAVE_DB，几何模型建立完毕。

提示：本例若用自底向上建模方法，则相对步骤较多。在建模时，根据模型特点，要灵活运用不同的建模思路进行模型的建立。

2.3.3 布尔运算常用命令

ANSYS 中，可以通过布尔运算（Booleans）进行几何图形的加减、搭接及黏结等操作。

（1）相加（Add）：对所有图元进行叠加，包含原始各图元的所有部分，生成一个新图元。各个原始图元的公共边界将被清除，形成一个单一的整体。在 ANSYS 的面相加中，只能对共面的图元进行操作。

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add。

（2）搭接（Overlap）：将分离的同阶图元转变为一个连续体，其中图元的所有重叠区域将独立成为一个图元。搭接与相加操作类似，但相加操作是由几个图元生成一个图元整体，而搭接则是由几个图元生成更多的图元，相交的部分被分离出来。

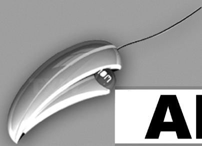
路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Overlap。

（3）黏结（Glue）：将多个图元组合成一个连续体，图元之间仅在公共边界处相连，其公共边界的维数低于原始图元一维。黏结操作与相加操作类似，但不同的是这些图元之间仍然相互独立，只是在边界上连接。黏结操作通常还与搭接操作配合使用。

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Glue。

简而言之，归纳如下。

- Add：把两者熔了，重塑一个。
- Overlap：在两者相交处新生成“第三者”，原来的各少一块。
- Glue：两者连接处涂胶水，粘上。



2.4 直接建立有限元模型

一般的建模思路是生成几何模型，然后通过划分网格生成有限元模型。不过，对于一些主要由杆系组成的模型，也可以通过建立节点与单元，直接生成有限元模型。下面以一简单的桁架结构为例，说明直接生成有限元模型的方法。桁架有限元模型如图 2-20 所示。

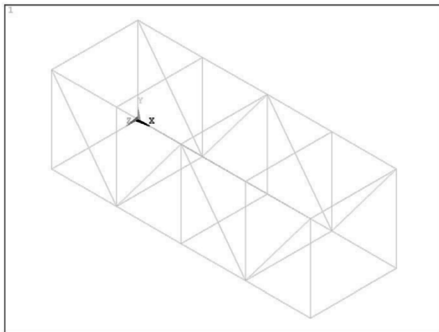


图 2-20　桁架有限元模型

2.4.1 节点的生成

节点的生成类似于关键点的生成，但是二者的本质完全不同。

所谓关键点是几何点，由关键点创建的模型是几何模型，要经过划分网格和赋予属性转化为有限元模型，才能进行有限元分析；而节点则是有限元模型的求解点。

生成节点的步骤如下：

（1）路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS。

（2）弹出 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE Node number 框中输入节点编号，在 X，Y，Z Location in active CS 框中分别输入 X、Y、Z 坐标值，THXY，THYZ，THZX Rotation angels（deyrees）框则用于输入 3 个转角值，如图 2-21 所示。

在此依次输入节点编号及坐标如下：

点 1（0，0）；点 2（3，0）；点 3（6，0）；点 4（9，0）；点 5，（12，0）；点 6（12，4）；点 7（9，4）；点 8（6，4）；点 9（3，4）；点 10（0，4）。

（3）单击 OK 按钮，生成节点，如图 2-22 所示。

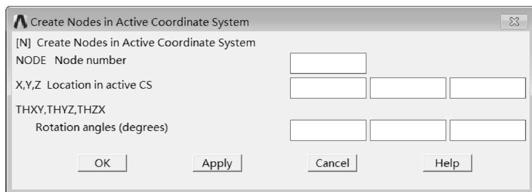


图 2-21　Create Nodes in Active Coordinate System 对话框

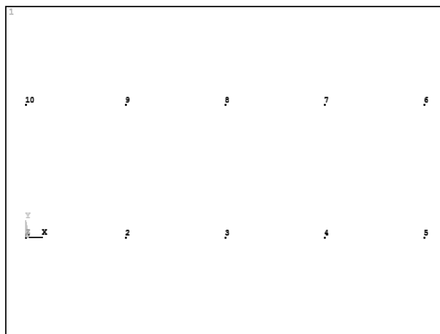


图 2-22　生成的节点

2.4.2 单元的生成

ANSYS 中的单元必须有相应的单元类型以及材料属性，因此在生成单元前必须先对其进行设置。

（1）本例采用 LINK180 单元。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Add 在弹出的 Library of Element Types 对话框中选择 Link > 3D finit stn 180，然后单击 OK 按钮，如图 2-23 所示。

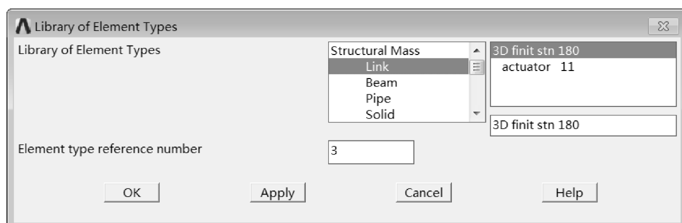


图 2-23 Library of Element Types 对话框

（2）通过路径 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models，设定模型的材料。

（3）通过路径 Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete，设定单元实常数。关于实常数，在后面的章节会有专题介绍，此处设置杆单元的截面积为 0.002。

（4）通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes，依次拾取想要连成单元的两个节点，类似于两关键点生成直线的操作。单击 OK 按钮，完成每一个单元的生成。

此时单元所拥有的单元类型以及其他属性就是之前所设定的那样。生成单元如图 2-24 所示。

（5）通过复制，生成另一侧的桁架。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Elements > Auto Numbered，拾取所有已生成的单元，单击 OK 按钮；在弹出的新的对话框中，设置 ITIME = 2，DZ = 4；单击 OK 按钮，生成两排桁架。

（6）连接桁架间的对应节点，最终得到全套桁架，如图 2-25 所示。

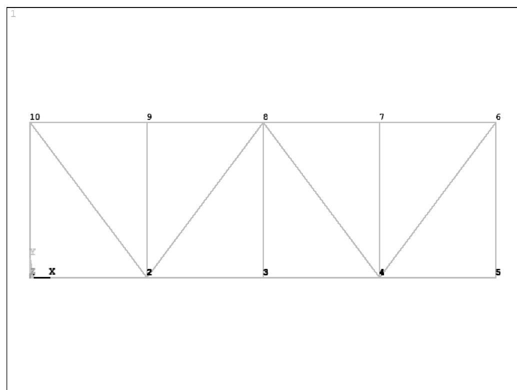


图 2-24 生成单元

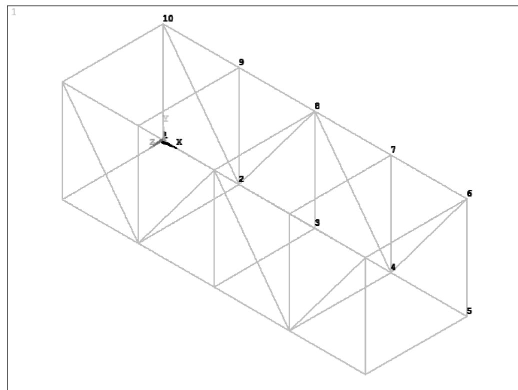


图 2-25 全套桁架

此时，生成的模型即是有限元模型，每一段杆件为一个单元。

2.5 一些快速建模命令

在建立复杂模型时，用传统的方法一点一线地建模，效率很低且容易出错。合理运用多功能建模语句，既可以大幅提高工作效率，又能避免人为操作带来的错误。

2.5.1 复制命令

在 ANSYS 中，可以对既有的几何元素（点、线、面、体）及节点、单元等进行复制操作。在一些有规则的重复性模型中，运用复制命令可以大大提高建模效率。

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy。

2.5.2 镜像命令

ANSYS 中提供了镜像功能，可将已存在的模型相对于选中的坐标轴镜像生成对称的另一边的模型。

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect。

2.5.3 对象的选择与删除

1. 对象的选择

在做相应操作时，可以通过鼠标直接拾取指定目标；但是在模型复杂时，这种方法并不方便，此时可以通过要拾取对象的不同属性特征进行拾取。

通过路径 Utility Menu > Select > Entities，打开如图 2-26 所示对话框。在该对话框中，可以选择要拾取的对象，包括关键点、线、面、体、单元、节点，如图 2-27 所示；也可以设置拾取方式，如图 2-28 所示。



图 2-26 Select Entities 对话框

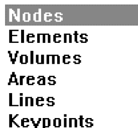


图 2-27 拾取对象



图 2-28 拾取方式

2. 对象的删除

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete。

2.6 CAD 几何模型导入

ANSYS 的建模功能有时无法满足用户的需求，尤其是建立复杂的几何模型时，不如其他 CAD 软件方便和准确。用户可以在 CAD 软件中建立几何模型，然后将其导入 ANSYS 进行分析。

ANSYS 提供了各种 CAD 软件的直接接口和中性几何文件接口，用于导入各种 CAD 软件建立的几何模型。

通过路径 Utility Menu > File > Import，打开如图 2-29 所示子菜单，选择其中某一项即可将相应类型的 CAD 几何模型导入 ANSYS。

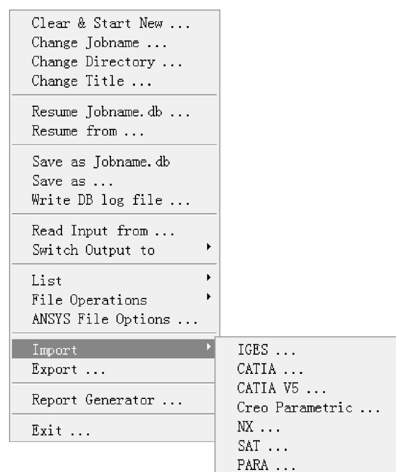


图 2-29　导入 CAD 几何模型子菜单

常用的各种 CAD 软件、文件类型和 ANSYS 接口的对应关系见表 2-1。

表 2-1　CAD 软件、文件类型和 ANSYS 接口的对应关系

CAD 软件	文件类型	ANSYS 接口
CATIA 4.X 及低版本	.model 或 .dlv	CATIA
CATIA 5.X	.CATPart 或 .CATProduct	CATIA V5
Pro/ENGINEER	.prt	Pro/ENGINEER
Unigraphics	.prt	Unigraphics
Parasolid	.x_t 或 .xmt_txt	Parasolid
Solid Edge	.x_t 或 .xmt_txt	Parasolid
SolidWorks	.x_t	Parasolid
Unigraphics	.x_t 或 .xmt_txt	Parasolid
AutoCAD	.sat	SAT
Mechanical Desktop	.sat	SAT
SAT	.sat	SAT
Solid Designer	.sat	SAT

以 AutoCAD 为例，可以充分利用其强大的绘图功能建立模型，然后导入 ANSYS 中进行计算。在 AutoCAD 中建立的模型可以通过以下两种方法导入 ANSYS：

（1）对于三维实体（3D Object），采用 SAT 格式进行转换。

AutoCAD：File > Export→保存类型选择 ACIS（ *. sat）→输入文件名→选择实体。

ANSYS：Utility Menu > File > Import > SAT，即可导入。

优点：采用 SAT 格式比较方便，而且一般不会有转换问题。

缺点：只能转换三维实体或面域。

（2）采用 IGES 格式进行转换。

AutoCAD 12 自带输出 IGES 格式文件工具，其他版本可通过 ALGOR 处理后再导入。

ANSYS：Utility Menu > File > Import > IGES，即可导入。

优点：各种实体类型都能转换。

另外，随着 ANSYS 软件应用的增加，纯粹的用于将 CAD 模型导入 ANSYS 的第三方软件应运而生，用户可根据需要自行选择工具软件，直接进行几何模型的导入。

优点：常用的非三维实体都能转换。

缺点：转换实体类型较少。

2.7 本章小结

本章为读者介绍了在 ANSYS 中建立几何模型的几种不同方法。

ANSYS 提供了两种间接的实体建模方法：自顶向下与自底向上。自顶向下进行实体建模时，用户定义一个模型的最高级图元（称为基元），如球、棱柱，程序则自动定义相关的面、线及关键点。用户利用这些高级图元可直接构造几何模型，如二维的圆和矩形以及三维的块、球、锥和柱。

此外，ANSYS 还可以直接建立有限元模型。这种方法可以省去建立几何模型和划分网格等工作，提高效率。

用户可以通过直接在 ANSYS 中建立模型或从 CAD 软件导入的方式获得模型。



第 3 章　单元与单元的控制

几何模型需要进行离散化，即划分网格生成单元，才能进行分析计算。合理的网格划分既可以提高计算效率，也可以提供可接受的结果精确度。

本章学习目标

- 了解 ANSYS 常用单元类型
- 学习定义单元属性
- 掌握网格参数的控制
- 学习划分生成网格

3.1　ANSYS 单元介绍

ANSYS 中的单元按照其应用的场合可分为结构单元、热单元、电磁单元、耦合场单元、流体单元、网格划分辅助单元、LS－DYNA 单元；按照其可用的维度可分为平面单元（二维）、空间单元（三维）。

每种单元都有属于自己的唯一的编号，如常用的 LINK180 即 180 号单元，SOLID65 即 65 号单元。

3.1.1　结构单元

ANSYS 中的大多数单元为结构单元，用户应根据不同的使用需要选择不同的单元。选择单元时应遵循以下原则。

- 在结构分析中，结构的应力状态决定单元类型的选择。
- 选择维数最低的单元去获得预期的结果（尽量做到能选择点而不选择线，能选择线而不选择平面，能选择平面而不选择壳，能选择壳而不选择三维实体）。
- 对于复杂结构，应当考虑建立两个或者更多的不同复杂程度的模型。可以建立简单模型，对结构承载状态或采用不同分析选项进行实验性探讨。

结构单元根据其特性进行分类，可以分为杆单元、梁单元、管单元、平面实体单元、空间实体单元、壳单元、弹簧单元、质量单元、接触单元、矩阵单元、表面效应单元、黏弹实体单元、超弹实体单元、耦合场单元、界面单元、显式动力分析单元等。

1. 杆单元

杆单元用于弹簧、螺杆、预应力螺杆和薄膜桁架等模型。常用的杆单元有 LINK8、

LINK10、LINK180 等。

在此要提醒的是，LINK8、LINK10 等单元在 ANSYS 17.0 的 GUI 界面已不再支持，但使用 APDL 命令仍然可以调用。下面对最常用的 LINK180 单元进行详细介绍。

LINK180 是一个适用于各类工程应用的三维杆单元，如图 3-1 所示。根据具体情况，该单元可以被看作桁架单元、索单元、链杆单元或弹簧单元等。本单元是一个轴向拉伸-压缩单元，每个节点有 3 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。

本单元是一种顶端铰接结构，不考虑单元弯曲。本单元具有塑性、蠕变、旋转、大变形和大应变功能。默认情况下，当考虑大变形时（NLGEOM，ON）任何分析中的 LINK180 单元都包括应力刚化选项。

本单元支持弹性、各向同性强化塑性、随动强化塑性、Hill 各向异性强化、Chaboche 非线性强化塑性和蠕变等。与本单元类似的一个仅受拉或仅受压的杆单元是 LINK10。

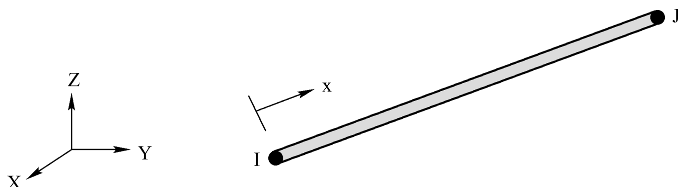


图 3-1 LINK180 单元示意图

LINK180 单元的输入参数及控制选项汇总如下。

- 节点：I,J。
- 自由度：UX,UY,UZ。
- 实常数：AREA——截面积；ADDMAS——质量；TENSKEY 为拉压选项，0——可以受拉、压，1——只受拉，-1——只受压。
- 材料属性：EX,(PRXY 或 NUXY),ALPX(或 CTEX 或 THSX),DENS,GXY,ALPD,BETD。
- 面荷载：无。
- 体荷载：温度 T(I),T(J)。
- 特殊属性：单元生死、初始状态、大挠度、大应变、线性扰动、非线性稳定、塑性、应力刚化、用户自定义材料、黏弹性、黏弹性/蠕变。

LINK180 输出定义见表 3-1。

表 3-1 LINK180 输出定义

名　称	定　义	O	R
EL	单元编号	Y	Y
NODES	节点编号	Y	Y
MAT	材料编号	Y	Y
REAL	实常数编号	Y	Y
XC,YC,ZC	结果输出位置	Y	1
TEMP	温度	Y	Y
AREA	截面积	Y	Y

（续）

名　称	定　义	O	R
FORCE	单元坐标系中的力分量	Y	Y
Sxx	轴向应力	Y	Y
EPELxx	轴向弹性应变	Y	Y
EPTOxx	总应变	Y	Y
EPEQ	塑性等效应变	2	2
Cur. Yld. Flag	当前屈服标志	2	2
Plwk	塑性应变能密度	2	2
Pressure	静水压	2	2
Creq	蠕变等效应变	2	2
Crwk_Creep	蠕变应变能密度	2	2
EPPLxx	轴向塑性应变	2	2
EPCRxx	轴向蠕变	2	2
EPTHxx	轴向热应变	3	3

注：1. O 列表示该项存在于 Jobname. OUT 文件；R 列表示该项存在于结果文件。
2. Y 表示该项是可用的。
3. 数字 1 表示仅质心可用。
4. 数字 2 表示仅在单元具有一个合适的非线性材料时可用。
5. 数字 3 表示仅在单元温度与参考温度不同时可用。

以上 3 种杆单元中，LINK8 为常用的杆单元，LINK10 常用于模拟缆绳及间隙，LINK180 则可以考虑黏弹塑性。

2. 梁单元

梁单元用于螺栓（杆）、薄壁管件、C 形截面构件、角钢或者狭长薄膜构件（只有膜应力和弯应力）等模型。

梁单元有弹性梁、塑性梁、渐变不对称梁、薄壁梁等。此处详细介绍 BEAM188 单元。

BEAM188 单元是三维线性有限应变梁单元，如图 3-2 所示。

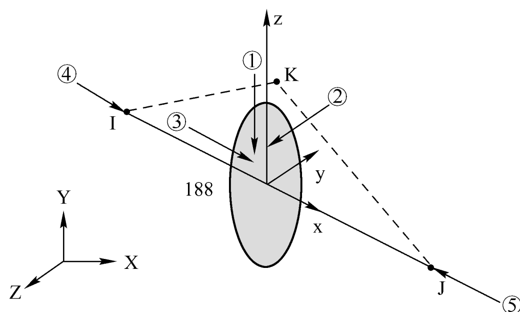


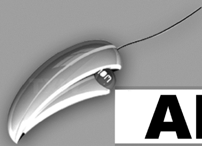
图 3-2　BEAM188 单元示意图

BEAM188 单元适用于分析从细长到中等粗短的梁结构。该单元基于铁木辛柯梁结构理论，并考虑了剪切变形的影响。

BEAM188 是三维线性（2 节点）或者二次梁单元。每个节点有 6 个或者 7 个自由度，自由度的个数取决于 KEYOPT（1）的值。当 KEYOPT（1）=0（默认）时，每个节点有 6 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动；当 KEYOPT（1）=1 时，引入了第 7 个自由度（横截面的翘曲），即每个节点有 7 个自由度。这个单元非常适合线性、大角度转动和非线性大应变问题。

当 NLGEOM 打开的时候，BEAM188 的应力刚化在任何分析中都是默认项。应力刚化选项使本单元能分析弯曲、横向及扭转稳定问题（用弧长法分析特征值屈曲和塌陷）。

BEAM188/ BEAM 189 可以采用 SECTYPE、SECDATA、SECOFFSET、SECWRITE 及



SECREAD 定义横截面。本单元支持弹性、蠕变及塑性模型（不考虑横截面子模型）。这种单元类型的截面可以由不同材料组成。

BEAM 188 从 ANSYS 6.0 版本开始忽略任何实参数，可参考 SECCONTROLS 命令来定义横向剪切刚度和附加质量。

单元坐标系与 BEAM188 单元无关。

BEAM188/BEAM189 单元可以用在细长或者短粗的梁上。由于一阶剪切变形的限制，只有适度的“粗”梁可以分析。梁的长细比（GAL^2/（EI））可以用来判定单元的适用性，其中 G 为剪切模量，A 为截面积，L 为长度，EI 为抗弯刚度。推荐长细比要大于 30。

BEAM188/BEAM189 在一些截面点的截面相关量（积分面积、位置、泊松比、函数导数等），可通过 SECTYPE 和 SECDATA 命令自动计算得到。每个截面假定是由一系列预先指定的 9 个节点组合而成。如图 3-3 所示为矩形截面和槽型截面。每个截面单元有 4 个积分点，每个积分点可设置独立的材料属性。

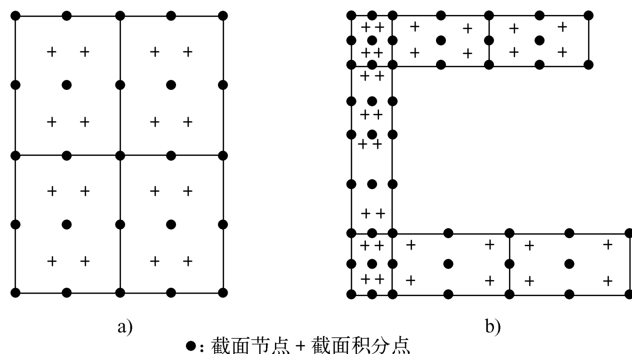


图 3-3　BEAM188 单元的矩形截面与槽形截面

使用 SECTYPE 命令可以定义多种截面类型，如图 3-4 所示。

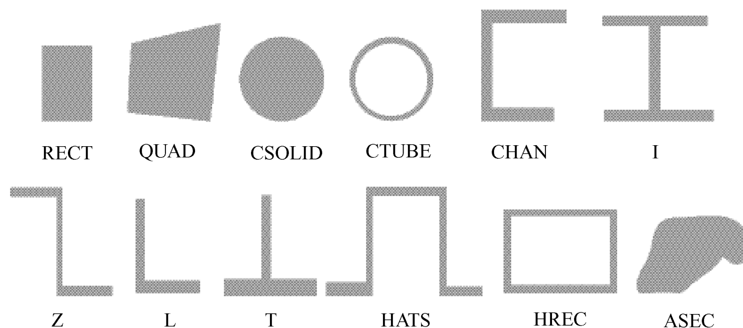


图 3-4　不同的截面类型

3. 管单元

管单元是一类轴向拉压、扭转、弯曲的空间单元，每个节点均有 6 个自由度。

PIPE16 是一个轴向拉压、扭转和弯曲单元，如图 3-5 所示。每个节点有 6 个自由度——沿节点坐标系 *X*、*Y*、*Z* 方向的平动和绕 *X*、*Y*、*Z* 轴的转动。该单元以三维梁单元（BEAM4）为基础，并包含了用于处理管的对称性和标准管几何尺寸的专用特性。

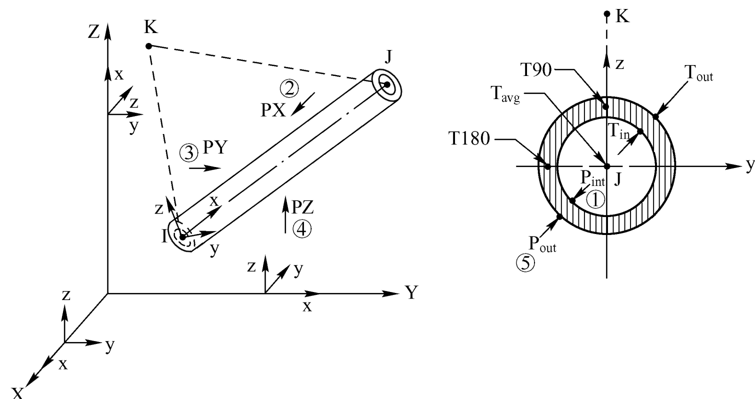


图 3-5　PIPE16 单元示意图

PIPE17 是由 3 个单轴直管单元（PIPE16）组合而成的 T 形管单元，如图 3-6 所示。该单元具有拉压、扭转和弯曲功能。每个节点有 6 个自由度，即沿节点坐标系 *X*、*Y*、*Z* 方向的平动和绕 *X*、*Y*、*Z* 轴的转动。PIPE17 包含 T 形接头弹性选项、应力增强系数选项和打印单元力选项。该单元还考虑了绝热、内部流体和腐蚀。

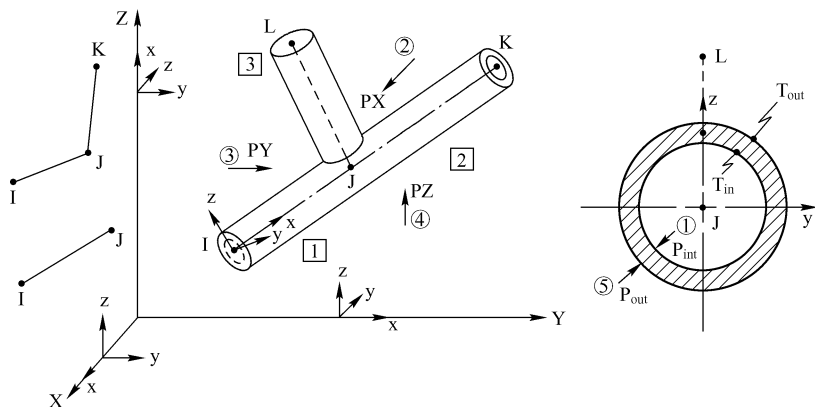


图 3-6　PIPE17 单元示意图

PIPE18 是具有拉压、扭转和弯曲功能的环形单轴单元，如图 3-7 所示。每个节点有 6 个自由度，即沿节点坐标系 *X*、*Y*、*Z* 方向的平动和绕 *X*、*Y*、*Z* 轴的转动。单元控制选项中包括多种弹性和应力强化系数。该单元还考虑了绝热、内部流体和腐蚀。

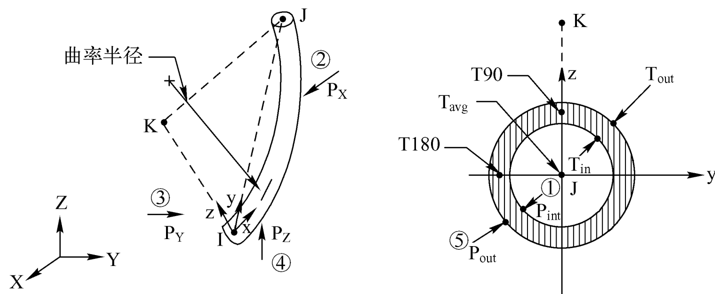
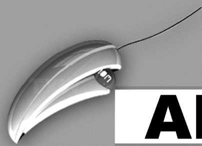


图 3-7　PIPE18 单元示意图



PIPE20 是具有拉压、弯曲和扭转性能的环形单轴单元，每个节点有 6 个自由度，即沿节点坐标系 *X*、*Y*、*Z* 方向的平动和绕 *X*、*Y*、*Z* 轴的转动，如图 3-8 所示。该单元具有塑性、蠕变、膨胀功能。若不考虑以上这些影响，可以选用弹性管单元 PIPE16。

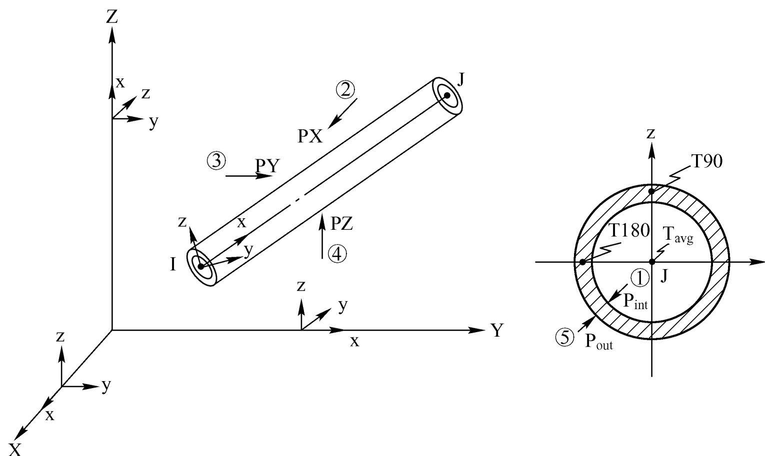


图 3-8　PIPE20 单元示意图

PIPE59 是具有拉伸－压缩、扭转和弯曲功能，并有薄膜力以模拟海洋波浪和电流作用的单轴单元，如图 3-9 所示。该单元每个节点有 6 个自由度，即沿节点坐标系 *X*、*Y*、*Z* 方向的平动和绕 *X*、*Y*、*Z* 轴的转动。除了荷载包括水的动力和浮力的影响，以及质量包括水和管内部件的附加质量之外，本单元的其他特性与 PIPE16 类似。该单元还有电缆选项（与 LINK8 类似）、应力刚化和大挠度功能。

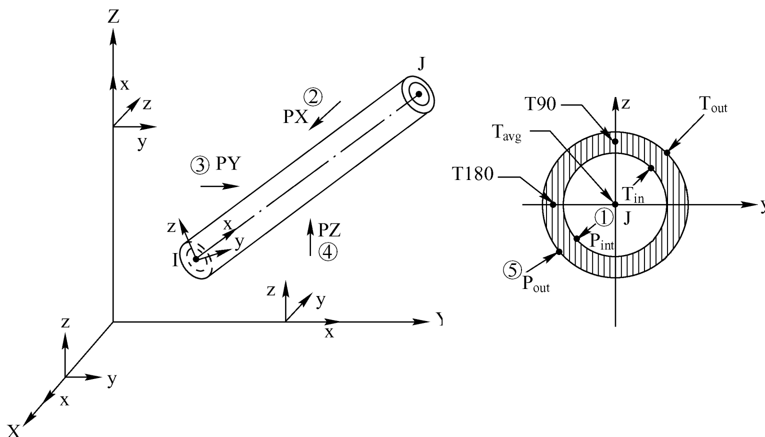


图 3-9　PIPE59 单元示意图

PIPE60 是具有拉伸－压缩、弯曲和扭转功能的环形单轴单元，如图 3-10 所示。该单元每个节点有 6 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动。该单元具有塑性、蠕变和膨胀功能。如果不需要这些性能，可以用弹性弯管单元 PIPE18。可以选用包括挠度系数和在单元坐标系内输出作用在单元上的力和弯矩的选项。

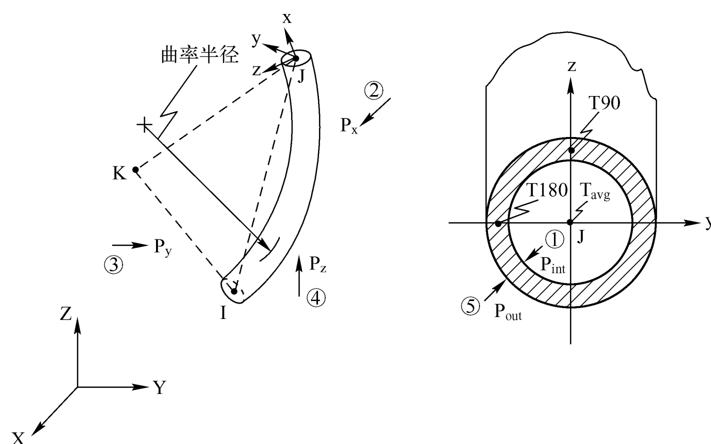


图 3-10　PIPE60 单元示意图

以上几种单元是 ANSYS 17.0 中作为存档的旧功能，提供有限支持的单元类型，只能在 APDL 命令流中调用。但在工程实际中，由于这些单元简洁实用，仍有广泛应用。

4. 平面实体单元

平面实体单元是一类非常重要、用途广泛的单元。熟练运用平面实体单元可以将空间问题简化到平面上解决，极大地方便计算，节约时间。

ANSYS 提供了大量平面实体单元，如理论学习中最常见的二次三角形单元 PLANE2、二次四边形单元 PLANE82 等。新的平面如 PLANE182、PLANE183 等。

（1）PLANE182 简介如下。

PLANE182 用于二维实体结构建模。本单元即可用作平面单元（平面应力、平面应变或广义平面应变），也可作为轴对称单元。

本单元有 4 个节点，每个节点有 2 个自由度，分别为节点 X 和 Y 方向的平移。本单元具有塑性、超弹性、应力刚化、大变形和大应变能力，也具备力－位移混合公式的能力，可以模拟接近不可压缩的弹塑性材料和完全不可压缩超弹性材料的变形。

在图 3-11 中给出了本单元的几何形状、节点位置和坐标系。单元输入数据包括 4 个节点、1 个厚度（仅对平面应力选项）以及正交异性材料特性。单元坐标系的默认方向与全局直角坐标系相同。可以用 ESYS 命令定义单元坐标系，它确定了正交异性材料的方向。

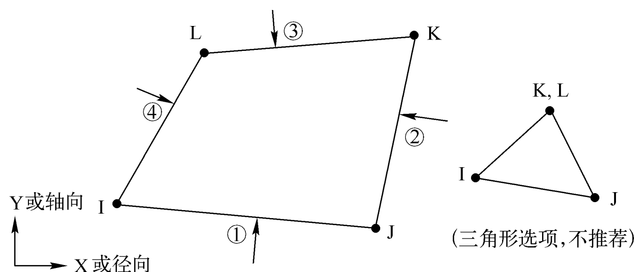


图 3-11　PLANE182 单元示意图

对平面问题，除了 KEYOPT(3) = 3 或 KEYOPT(3) = 5 的情况外，本单元如有节点力，应输入厚度方向每单位长度的力值；对轴对称问题应输入整个圆周（360°）的力值。

KEYOPT(3) = 5 用于确立广义应变能力。关于广义平面应变选项的更多信息，参见 ANSYS 单元手册中的“18x 实体单元的广义平面应变选项”。KEYOPT(6) = 1 设置单元形状函数为位移－力混合公式。关于使用混合公式的更多细节，参见 ANSYS 单元手册中的“位

移－力混合公式的应用”。

使用 ISTRESS 或 ISFILE 命令可以对本单元施加一个初始应力状态；也可以设置 KEYOPT(10)＝1，从用户子程序 USTRESS 中读入初始应力。

本单元自动包括压力荷载刚度效应。如果要求非对称的压力荷载刚度效应矩阵，使用命令 NROPT,UNSYM。

PLANE182 单元输入参数及控制选项汇总如下。

- 节点：I,J,K,L。
- 自由度：UX,UY。
- 实常数：THK——厚度（仅用于 KEYOPT(3)＝3）；HGSTF——沙漏刚度比例因子（仅用于 KEYOPT(1)＝1），默认为 1.0（如果输入 0.0，使用默认值）。
- 材料性能：EX,EY,EZ,PRXY,PRYZ,PRXZ（或 NUXY,NUYZ,NUXZ),ALPX,ALPY,ALPZ（或 CTEX,CTEY,CTEZ 或 THSX,THSY,THSZ),DENS,GXY,GYZ,GXZ,DAMP。
- 面荷载：压力——边 1(J－I),边 2(K－J),边 3(L－K),边 4(I－L)。
- 体荷载：温度——T(I),T(J),T(K),T(L)。
- 求解能力：塑性、超弹性、黏弹性、黏塑性、蠕变、应力刚化、大变形、大应变、初应力输入、单元技术自动选择、生死单元。支持用 TB 命令输入 ANEL、BISO、MISO、NLISO、BKIN、MKIN、KINH、CHABOCHE、HILL、RATE、CREEP、HYPER、PRONY、SHIFT、CAST、SMA 和 USER 等类型的数据表。
- 关键选项，整理如下。
  - ■ KEYOPT（1）：单元技术。0——使用 B－bar 方法的全积分；1——由沙漏控制的均匀减缩积分；2——增强的应变公式；3——简化的增强应变公式。
  - ■ KEYOPT（3）：单元特性。0——平面应力；1——轴对称；2——平面应变（Z 向应变为 0.0）；3——有厚度输入的平面应力；5——广义平面应变。
  - ■ KEYOPT（6）：单元公式。0——纯位移公式（默认）；1——使用位移/力（U/P）混合公式（对平面应力无效）。
  - ■ KEYOPT（10）：用户定义初始应力。0——不使用子程序提供初始应力（默认）；1——由 USTRESS 子程序读入初始应力。

PLANE182 应力输出如图 3-12 所示。

PLANE182 输出定义见表 3-2。

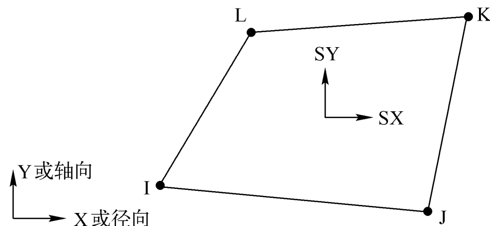


图 3-12　PLANE182 应力输出

表 3-2　PLANE182 输出定义

名　称	定　义	O	R
EL	单元号	－	Y
NODES	节点 I,J,K,L	－	Y
MAT	材料号	－	Y
THICK	平均厚度	－	Y
VOLU	体积	－	Y

（续）

名　　称	定　　义	O	R
XC,YC	结果输出点位置	Y	3
PRES	压力，P1 在节点 J,I；P2 在 K,J；P3 在 L,K；P4 在 I,L	–	Y
TEMP	温度 T(I),T(J),T(K),T(L)	–	Y
S：X,Y,Z,XY	应力（对平面应力单元 SZ=0.0）	Y	Y
S：1,2,3	主应力	–	Y
S：INT	应力强度	–	Y
S：EQV	当量应力	Y	Y
EPEL：X,Y,Z,XY	弹性应变	Y	Y
EPEL：1,2,3	弹性主应变	–	Y
EPEL：EQV	当量弹性应变[6]	Y	Y
EPTH：X,Y,Z,XY	热应变	2	2
EPTH：EQV	当量热应变[6]	2	2
EPPL：X,Y,Z,XY	塑性应变[7]	1	1
EPPL：EQV	当量塑性应变[6]	1	1
EPCR：X,Y,Z,XY	蠕变应变	1	1
EPCR：EQV	当量蠕变应变[6]	1	1
EPTO：X,Y,Z,XY	总工程应变（EPEL+EPPL+EPCR）	Y	–
EPTO：EQV	总当量工程应变（EPEL+EPPL+EPCR）	Y	–
NL：EPEQ	累积的当量塑性应变	1	1
NL：CREQ	累积的当量蠕变应变	1	1
NL：SRAT	塑性屈服（1=进入屈服，0=未屈服）	1	1
NL：PLWK	塑性功	1	1
NL：HPRES	静水压力	1	1
SEND：ELASTIC,PLASTIC,CREEP	应变能密度	–	1
LOCI：X,Y,Z	积分点位置	–	4
SVAR：1,2,...,N	状态变量	–	5

注：表示字母 O、R、Y 和数字的含义同表 2-1。

（2）PLANE183 简介如下。

PLANE183 是一个高阶二维 8 节点单元，如图 3-13 所示。PLANE183 具有二次位移函数，能够很好地适应不规则模型的划分（如由不同 CAD/CAM 产生的模型）。

本单元有 8 个节点，每个节点有 2 个自由度，分别为 X 和 Y 方向的平移。本单元既可用作平面单元（平面应力、平面应变和广义平面应变），也可用作轴对称单元。本单元具有塑性、蠕变、应力刚化、大变形及大应变的能力，也具备力－位移混合公式的能力，可以模拟接近不可压缩的弹塑性材料的变形。它支持初应力选项，有多种打印输出选项可用。

PLANE183 单元的输入参数及控制选项汇总如下。

- 节点：I,J,K,L,M,N,O,P。

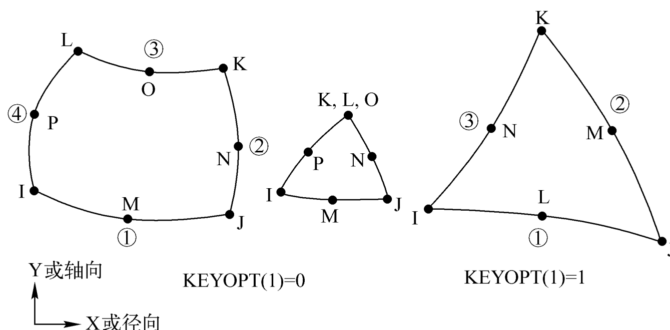


图 3-13 PLANE183 单元示意图

- 自由度：UX，UY。
- 实常数：如果 KEYOPT(3) =0、1 或 2，没有实常数；THK——厚度（当 KEYOPT(3) = 3 时）。
- 材料性能：EX，EY，EZ，PRXY，PRYZ，PRXZ（或 NUXY，NUYZ，NUXZ），ALPX，ALPY，ALPZ（或 CTEX，CTEY，CTEZ 或 THSX，THSY，THSZ），DENS，GXY，GYZ，GXZ，DAMP。
- 面荷载：压力。
- 体荷载：温度。
- 求解能力：塑性、超弹性、黏弹性、黏塑性、蠕变、应力刚化、大变形、大应变、初应力输入、单元技术自动选择、生死单元；支持用 TB 命令输入 ANEL，BISO，MISO，NLISO，BKIN，MKIN，KINH，CHABOCHE，HILL，RATE，CREEP，HYPER，PRONY，SHIFT，CAST，SMA 和 USER 等类型的数据表。
- 关键选项，整理如下。
  - KEYOPT（3）：单元特性。0——平面应力；1——轴对称；2——平面应变（Z 向应变为 0.0）；3——有厚度输入的平面应力；5——广义平面应变。
  - KEYOPT（6）：单元公式。0——纯位移公式（默认）；1——使用位移/力（U/P）混合公式（对平面应力无效）。
  - KEYOPT（10）：用户定义初始应力。0——不使用子程序提供初始应力（默认）；1——由 USTRESS 子程序读入初始应力。

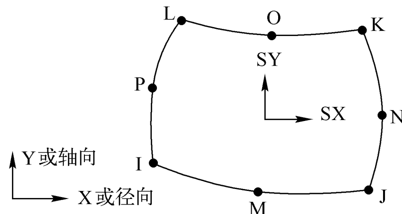


图 3-14 PLANE183 应力输出

BEAM183 应力输出如图 3-14 所示。

PLANE183 输出定义见表 3-3。

表 3-3 PLANE183 输出定义

名 称	定 义	O	R
EL	单元号	-	Y
NODES	节点 I，J，K，L	-	Y
MAT	材料号	-	Y
THICK	平均厚度	-	Y

（续）

名　称	定　义	O	R
VOLU	体积	–	Y
XC,YC	结果输出点位置	Y	3
PRES	压力，P1 在节点 J,I；P2 在 K,J；P3 在 L,K；P4 在 I,L	–	Y
TEMP	温度 T(I),T(J),T(K),T(L)	–	Y
S：X,Y,Z,XY	应力（对平面应力单元 SZ=0.0）	Y	Y
S：1,2,3	主应力	–	Y
S：INT	应力强度	–	Y
S：EQV	当量应力	–	Y
EPEL：X,Y,Z,XY	弹性应变	Y	Y
EPEL：1,2,3	弹性主应变	Y	–
EPEL：EQV	当量弹性应变［7］	–	Y
EPTH：X,Y,Z,XY	热应变	3	3
EPTH：EQV	当量热应变［7］	–	3
EPPL：X,Y,Z,XY	塑性应变［8］	1	1
EPPL：EQV	当量塑性应变［7］	–	1
EPCR：X,Y,Z,XY	蠕变应变	2	2
EPCR：EQV	当量蠕变应变［7］	2	2
EPTO：X,Y,Z,XY	总工程应变（EPEL+EPPL+EPCR）	Y	–
EPTO：EQV	总当量工程应变（EPEL+EPPL+EPCR）	Y	–
NL：EPEQ	累积的当量塑性应变	1	1
NL：CREQ	累积的当量蠕变应变	1	1
NL：SRAT	塑性屈服（1=进入屈服，0=未屈服）	1	1
NL：SEPL	节点在应力–应变曲线上的当量应力	1	1
NL：PLWK	塑性功	1	1
NL：HPRES	静水压力	1	1
SEND：ELASTIC,PLASTIC,CREEP	应变能密度	–	1
LOCI：X,Y,Z	积分点位置	–	5
SVAR：1,2,...,N	状态变量	–	6

说明：

- 非线性结果，只有在单元为非线性材料时输出；
- 仅当单元有蠕变荷载时输出；
- 仅当单元有热荷载时输出；
- 仅用于 *GET 命令，给出单元中心处结果；
- 仅在使用 OUTRES,LOCI 时可用；
- 仅在使用 USERMAT 子程序和 TB,STATE 命令时可用；
- 当量应变使用有效泊松比：对于弹性和热问题，该值由用户给出（MP，PRXY 命令）；对于塑性和蠕变问题，该值为 0.5；

- 对于形状记忆合金材料模型，转换应变作为塑性应变 EPPL 输出。

PLANE183 单元的面积必须是正的；本单元必须位于全局坐标系的 X－Y 平面中，对于轴对称分析 Y 轴必须是对称轴，轴对称结构建模必须满足 X≥0；如果删除某边的中间节点，就意味着沿该边的位移成为线性变化的。

5. 空间实体单元

空间实体单元（SOLID）在任何有限元分析中都是很常用的单元。实际工程经常会遇到复杂结构，无法用线、面进行简化时，只能采用实际模型计算。有时为了使计算结果更直观，如果时间允许的话也经常采用空间实体单元。

常用的空间实体单元有 SOLID65、SOLID185、SOLID186 等。

（1）SOLID65 简介如下。

SOLID65 单元用于模拟三维含钢筋或不含钢筋的混凝土模型。该单元能够计算开裂与压碎。在混凝土应用中，可利用该单元的实体功能来建立混凝土模型，还可利用其加筋功能来建立钢筋混凝土模型。此外，该单元也可用于其他方面，如加筋复合材料（如玻璃纤维）及地质材料（如岩石）。该单元由 8 个节点定义，每个节点有 3 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。可对 3 个方向的含筋情况进行定义，至多可以定义 3 种不同规格的钢筋。

本单元与 SOLID45 单元（三维结构实体单元）类似，只是增加了特别的开裂与压碎功能。本单元最重要的功能在于其对非线性材料的处理。它可以模拟混凝土的开裂（沿 3 个正交方向）、压碎、塑性变形及蠕变，还可模拟钢筋的拉伸、压缩、塑性变形及蠕变，但不能模拟钢筋的剪切性能。

先来看 SOLID65 输入数据。

该单元几何图形、节点位置、单元坐标系如图 3-15 所示。单元性质为 8 节点各向同性材料，其中包括 1 种实体材料和 3 种钢筋材料，用命令 MAT 输入对混凝土材料的定义，而有关钢筋的细则需在实常数中定义，包括材料号、体积率、方向角（THETA，PHI），钢筋的方向角可通过命令/Eshape 以图示方式校验。

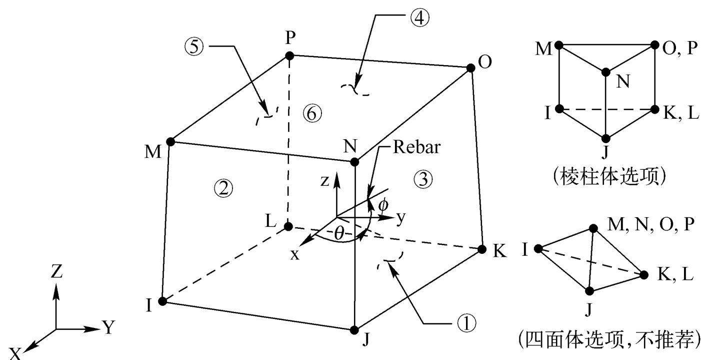


图 3-15 SOLID65 单元示意图

体积率是指钢筋的体积与整个单元体积之比。钢筋的方向通过单元坐标系中的两个角度（度制）来定义。当钢筋的材料号为 0 或等于单元的材料号时，则不考虑它的作用。

另外，有关混凝土的材料定义，如剪力传递系数、拉应力、压应力都应在数据表中给

出，详细描述见表3-4。通常剪力传递系数为0~1.0，0表示平滑的裂缝（完全丧失剪力传递作用），1表示粗糙的裂缝（几乎没有失去剪力传递作用）。这就有利于对裂缝开裂与闭合进行描述。

表3-4 SOLID65混凝土材料数据表

常 数	含 义
1	开放裂纹剪力传递系数
2	闭合裂纹剪力传递系数
3	单轴拉伸裂纹应力（正向）
4	单轴压应力（正向）
5	双轴压应力（正向）
6	采用常数7和8条件下的环境静水压态
7	在常数为6的环境静水压态下的双轴压应力（正向）
8	在常数为6的环境静水压态下的单轴压应力（正向）
9	在时间步为1（默认为0.6）条件下，适用于裂纹拉伸的刚度乘数

有关单元荷载的描述见“节点单元荷载”（ANSYS帮助中专有一节）。压力作为面荷载作用在单元表面，如图3-15中带圈数字所示。主动力作用在单元内。温度和热流量可在节点上作为单元体荷载输入。节点I的温度T（I）默认为TUNIF；如其他节点温度没有被指定，则它们默认为T（I）。对于其他的输入模型，当未指定温度时默认值都为TUNIF。对热流量的设定，除用0取代TUNIF外，与温度的设定是相同的。

命令TREF和BETAD分别用来设定整体的基准温度和阻尼值。可以使用MAT命令指定与单元相关的基准温度值（MP，REFT）或阻尼值（MP，DAMP），但不能对钢筋的材料号进行以上定义。

KEYOPT（1）用于设定是否考虑大变形，KEYOPT（5）和KEYOPT（6）则提供多种单元输出选项（详见单元解答）。

KEYOPT（7）用于设置是否考虑应力松弛。当KEYOPT（7）=1时表示考虑，目的是加速裂缝即将开裂时计算的收敛（“SQLID65混凝土材料数据表”第9个系数中的输入值即为拉伸应力松弛的折减系数）。应力松弛并不能反映因为次生裂缝的产生而引起的应力应变关系的变化。松弛系数在裂缝处为零，因此相应的开裂面上的刚度也是零。

在几何非线性分析时，可用“SOLCONTROL,,,INCP”命令设定考虑抗压刚度的影响。抗压刚度的影响在线性屈曲分析中会被自动考虑。

SOLD65单元输入参数及控制选项汇总如下。

- 节点：I,J,K,L,M,N,O,P。
- 自由度：UX,UY,UZ。
- 实常数：MAT1,VR1,THETA1,PHI1,MAT2,VR2,THETA2,PHI2,MAT3,VR3,THETA3,PHI3（这里的MATn是材料号；VRn是体积率；而THETAn和PHIn为方向角，代表了3种钢筋材料）。
- 材料性质：EX,ALPX,PRXY or NUXY,DENS（用于混凝土）；EX,ALPX,DENS（用于每种钢筋）。还可通过MAT命令设定阻尼与基准温度。

- 表面荷载：压力——面1(J-I-L-K)、面2(I-J-N-M)、面3(J-K-O-N)、面4(K-L-P-O)、面5(L-I-M-P)、面6(M-N-O-P)。
- 体荷载：
  - 温度——T(I),T(J),T(K),T(L),T(M),T(N),T(O),T(P)。
  - 热流量——FL(I),FL(J),FL(K),FL(L),FL(M),FL(N),FL(O),FL(P)。
- 求解能力：Plasticity（塑性）、Creep（蠕变/徐变）、Cracking（开裂）、Crushing（压碎）、Large deflection（大变形）、Large strain（大应变）、Stress Stiffening（应力强化）、Birth and Death（单元生死）、Adaptive Descent。
- 关键选项，整理如下。
  - KEYOPT（1）：大变形控制。0——考虑大变形；1——不考虑。
  - KEYOPT（5）：混凝土线性解的输出控制。0——只打印质心的线性解；1——给出每个积分点的解；2——输出节点应力。
  - KEYOPT（6）：混凝土非线性解输出控制。0——只打印质心的线性解；3——同时给出积分点的解。
  - KEYOPT（7）：开裂后应力松弛考虑选项。0——不考虑拉伸应力松弛；1——考虑应力松弛，有助于计算收敛。

SOLID65 应力输出如图 3-16 所示。

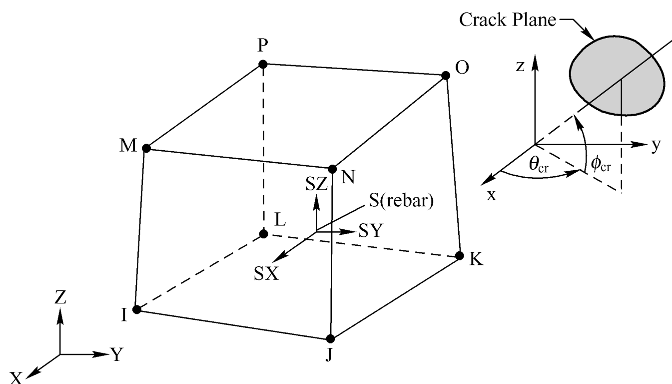


图 3-16 SOLID65 应力输出

与该单元相关的解答输出项包括以下两方面：所有节点的节点位移；其他输出项见表 3-5。

表 3-5 附加单元输出

名　称	定　义	O	R
EL	单元号	Y	Y
NODES	节点：I,J,K,L,M,N,O,P	Y	Y
MAT	材料号	Y	Y
NREINF	钢筋数量	Y	-
VOLU：	体积	Y	Y

（续）

名　　称	定　　义	O	R
PRES	压力作用面 P1 由节点 J,I,L,K 围成；P2 由 I,J,N,M 围成；P3 由 J,K,O,N 围成；P4 由 K,L,P,O 围成；P5 由 L,I,M,P 围成；P6 由 M,N,O,P 围成	Y	Y
TEMP	作用在各节点上的温度 T(I),T(J),T(K),T(L),T(M),T(N),T(O),T(P)	Y	Y
FLUEN	作用在各节点上的热流量 FL(I),FL(J),FL(K),FL(L),FL(M),FL(N),FL(O),FL(P)	Y	Y
XC,YC,ZC	Location where results are reported	Y	6
S：X,Y,Z,XY,YZ,XZ	应力	1	1
S：1,2,3	主应力	1	1
S：INT	应力强度	1	1
S：EQV	等效应力	1	1
EPEL：X,Y,Z,XY,YZ,XZ	弹性应变	1	1
EPEL：1,2,3	弹性主应变	1	–
EPEL：EQV	等效弹性应变［7］	1	1
EPTH：X,Y,Z,XY,YZ,XZ	平均热应变	1	1
EPTH：EQV	等效热应变［7］	4	4
EPPL：X,Y,Z,XY,YZ,XZ	塑性应变均值	4	4
EPPL：EQV	等效塑性应变［7］	4	4
EPCR：X,Y,Z,XY,YZ,XZ	蠕变均值	4	4
EPCR：EQV	等效蠕变［7］	4	4
NL：EPEQ	等效塑性应变均值	4	4
NL：SRAT	试验应力与屈服应力的比值	4	4
NL：SEPL	应力应变曲线上的平均等效应力（混凝土的）	4	4
NL：HPRES	静水压力	–	4
THETCR,PHICR	裂缝的方向角 THETA 和 PHI	1	1
STATUS	单元状态	2	2
IRF	钢筋号	3	–
MAT	材料号	3	–
VR	体积率	3	–
THETA	X – Y 平面内的方向角	3	–
PHI	X – Y 平面外的方向角	3	–
EPEL	单轴弹性应变	3	–
S	单轴弹性应力	3	–
EPEL	单轴弹性应变均值	5	5
EPPL	单轴塑性应变均值	5	5
SEPL	应力应变曲线上的平均等效应力（钢筋的）	5	5
EPCR	单轴蠕变均值（钢筋）	5	5

注：1. 表中字母 O、R、Y 的含义同表 2-1。
2. 数字 1 表示混凝土求解项；数字 2 表示单元状态；数字 3 表示钢筋求解项；数字 5 表示混凝土非线性积分点求解；数字 6 表示仅在质心处可用。

（2）SOLID185 简介如下。

SOLID185 用于建立三维实体结构模型，如图 3-17 所示。该单元由 8 个节点定义，每个节点有 3 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。本单元具有超弹性、应力刚化、蠕变、大变形和大应变等功能，还可利用混合公式模拟几乎不可压缩弹塑材料和完全不可压缩超弹性材料。

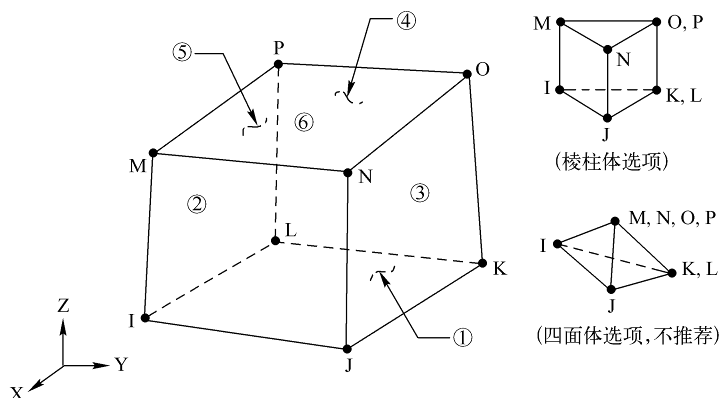


图 3-17　SOLID185 单元示意图

SOLID185 单元的输入参数及控制选项汇总如下。

- 节点：I,J,K,L,M,N,O,P。
- 自由度：UX,UY,UZ。
- 实常数：如果 KEYOPT(2) =0，没有实常数。KEYOPT(2) =1 时，HGSTF（球面刚化因子）
- 材料属性：EX,EY,EZ,PRXY,PRYZ,PRXZ（或 NUXY,NUYZ,NUXZ),GXY,GYZ,GXZ,ALPX,ALPY,ALPZ（CTEX,CTEY,CTEZ 或 THSX,THSY,THSZ),DENS,ALPD,BETD。
- 面荷载：压力——表面 1(J－I－L－K)、表面 2(I－J－N－M)、表面 3(J－K－O－N)、表面 4(K－L－P－O)、表面 5(L－I－M－P)、表面 6(M－N－O－P)。
- 体荷载：温度——T(I),T(J),T(K),T(L),T(M),T(N),T(O),T(P)；体荷载密度——全局正交坐标系 X、Y、Z 方向的荷载值。
- 求解能力：单元生死、弹性、单元技术自动选择、超弹性、初应力输入、大变形、大应变、线性扰动、非线性稳定、塑性、应力刚化、用户自定义材料、黏弹性、黏塑性/蠕变。

SOLID185 单元的输出定义见表 3-6。

表 3-6　SOLID185 输出定义

名　　称	定　　义	O	R
EL	单元编号	-	Y
NODES	节点：I,J,K,L,M,N,O,P	-	Y

（续）

名　称	定　义	O	R
MAT	材料编号	–	Y
VOLU：	体积	–	Y
XC，YC，ZC	结果输出位置	Y	3
PRES	压力，P1 在节点 J，I，L，K；P2 在 I，J，N，M；P3 在 J，K，O，N；P4 在 K，L，P，O；P5 在 L，I，M，P；P6 在 M，N，O，P	–	Y
TEMP	温度 T(I)，T(J)，T(K)，T(L)，T(M)，T(N)，T(O)，T(P)	–	Y
S：X，Y，Z，XY，YZ，XZ	应力	Y	Y
S：1，2，3	主应力	–	Y
S：INT	应力强度	–	Y
S：EQV	等效应力	–	Y
EPEL：X，Y，Z，XY，YZ，XZ	弹性应变	Y	Y
EPEL：EQV	等效弹性应变［6］	–	Y
EPTH：X，Y，Z，XY，YZ，XZ	热应变	2	2
EPTH：EQV	等效热应变［6］	2	2
EPPL：X，Y，Z，XY，YZ，XZ	塑性应变［7］	1	1
EPPL：EQV	等效塑性应变［6］	1	1
EPCR：X，Y，Z，XY，YZ，XZ	蠕变应变	1	1
EPCR：EQV	等效蠕变应变［6］	1	1
EPTO：X，Y，Z，XY，YZ，XZ	总机械应变（EPEL + EPPL + EPCR）	Y	–
EPTO：EQV	总等效机械应变（EPEL + EPPL + EPCR）	Y	–
NL：EPEQ	累积等效塑性应变	1	1
NL：CREQ	累积等效蠕变应变	1	1
NL：SRAT	塑性屈服（1 = 已经屈服；0 = 没有屈服）	1	1
NL：HPRES	静水压力	1	1
SEND：ELASTIC，PLASTIC，CREEP	应变能密度	–	1
LOCI：X，Y，Z	积分点位置	–	4
SVAR：1，2，…，N	状态变量	–	5

注：1. 表中字母 O、R、T 表示含义同表 2-1。
2. 数字 1 表示非线性时的输出；数字 2 表示单元有一个热载荷时的输出；数字 3 表示仅在质心时可用；数字 4 表示仅在 OUTRES，LOCI 时可用；数字 5 表示仅在 UserMat Subroutine，TB 时可用。

如图 3-18 所示为 SOLID185 单元层状结构几何模型，其输出如图 3-19 所示。

（1）SOLID186 简介如下。

SOLID186 是高阶的三维 20 节点实体结构单元，如图 3-20 所示。该单元具有二次位移模式，适于生成不规则网格模型（如由各种 CAD/CAM 系统生成的模型）。

本单元由 20 个节点定义，每个节点有 3 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。SOLID186 可具有任意的空间各向异性。本单元具有塑性、超弹性、蠕变、应力刚化、大变形和大应变等功能，还可利用混合公式模拟几乎不可压缩弹塑材料或完全不可压缩超弹

性材料，如图 3-20 所示。

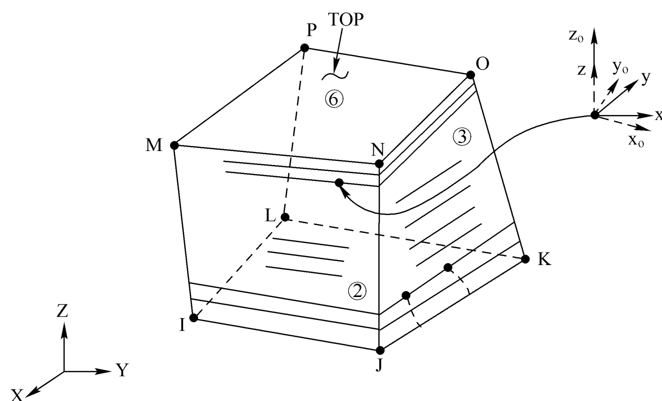


图 3-18 SOLID185 单元层状结构模型

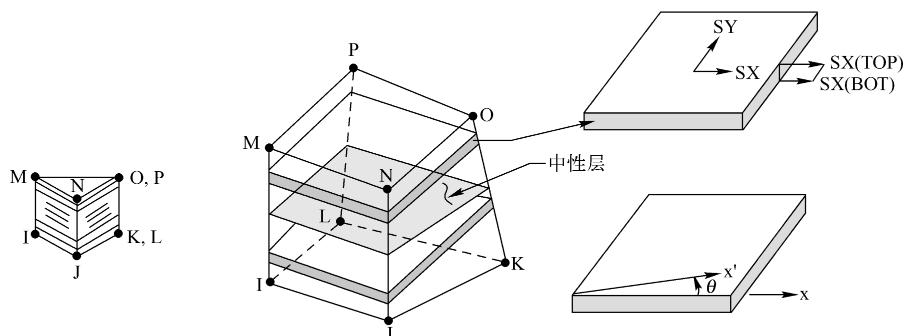


图 3-19 SOLID185 单元层状结构输出示意图

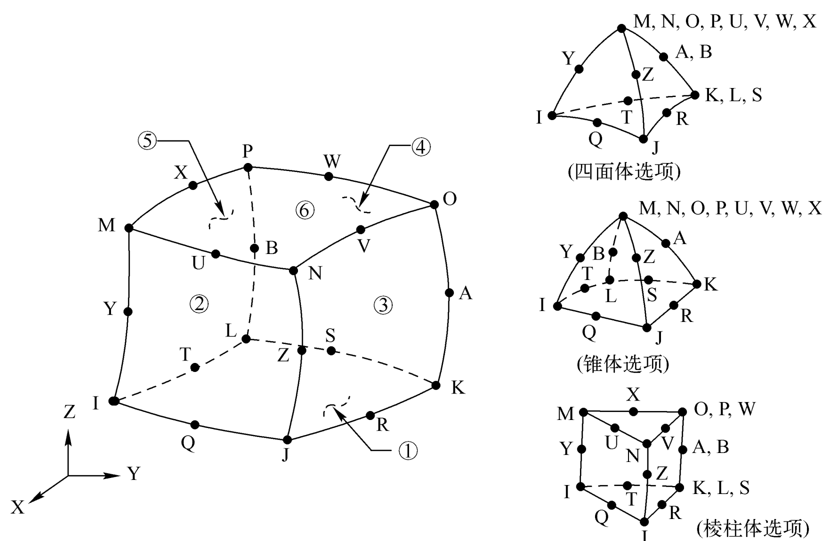


图 3-20 SOLID186 单元几何模型

SOLID186 应力输出如图 3-21 所示。

SOLID186 输出定义见表 3-7。

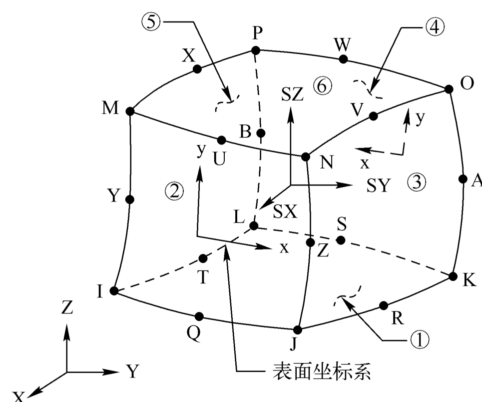


图 3-21　SOLID186 应力输出

表 3-7　SOLID186 输出定义

名　　称	定　　义	O	R
EL	单元编号	–	Y
NODES	节点：I,J,K,L,M,N,O,P	–	Y
MAT	材料编号	–	Y
VOLU	体积	–	Y
XC,YC,ZC	结果输出位置	Y	3
PRES	压力，P1 在 J,I,L,K；P2 在 I,J,N,M；P3 在 J,K,O,N；P4 在 K,L,P,O；P5 在 L,I,M,P；P6 在 M,N,O,P	–	Y
TEMP	温度 T(I),T(J),T(K),T(L),T(M),T(N),T(O),T(P)	–	Y
S：X,Y,Z,XY,YZ,XZ	应力	Y	Y
S：1,2,3	主应力	–	Y
S：INT	应力强度	–	Y
S：EQV	等效应力	–	Y
EPEL：X,Y,Z,XY,YZ,XZ	弹性应变	Y	Y
EPEL：EQV	等效弹性应变［6］	–	Y
EPTH：X,Y,Z,XY,YZ,XZ	热应变	2	2
EPTH：EQV	等效热应变［6］	2	2
EPPL：X,Y,Z,XY,YZ,XZ	塑性应变［7］	1	1
EPPL：EQV	等效塑性应变［6］	1	1
EPCR：X,Y,Z,XY,YZ,XZ	蠕变应变	1	1
EPCR：EQV	等效蠕变应变［6］	1	1
EPTO：X,Y,Z,XY,YZ,XZ	总机械应变（EPEL + EPPL + EPCR）	Y	–
EPTO：EQV	总等效机械应变（EPEL + EPPL + EPCR）	Y	–
NL：EPEQ	累积等效塑性应变	1	1
NL：CREQ	累积等效蠕变应变	1	1
NL：SRAT	塑性屈服（1 = 已经屈服；0 = 没有屈服）	1	1

（续）

名　　称	定　　义	O	R
NL：HPRES	静水压力	1	1
SEND：ELASTIC，PLASTIC，CREEP	应变能密度	–	1
LOCI：X，Y，Z	积分点位置	–	4
SVAR：1，2，...，N	状态变量	–	5

注：表中 O、R、Y 及数字的含义同表 3-5。

6. 壳单元

当结构的总体厚度相对于典型长度很小时可使用壳单元，对于长度比厚度大 20 倍以上的问题可决定使用壳单元。ANSYS 中的壳单元根据要求解的问题类型采用不同的公式。3 个基本的壳公式包括：薄膜理论、薄壳理论和厚壳理论。SHELL41 采用薄膜理论，忽略弯曲和横向剪切，只包含薄膜效应。SHELL63（见图 3-22）是薄壳单元，采用经典 Love – Kirchhoff 理论，包含弯曲和薄膜效应，但忽略横向剪切变形。SHELL43、SHELL143、SHELL181（见图 3-23）、SHELL91、SHELL93 和 SHELL99 是厚壳单元，采用 Reissner/Mindlin 理论，包含弯曲、薄膜和横向剪切效应。横向剪切被表示为整个厚度上的常剪切应变，这种一阶近似只适用于中等厚度壳体。

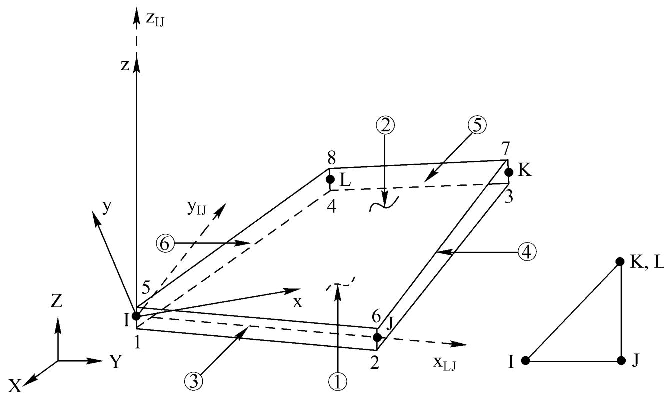


图 3-22　SHELL63 单元示意图

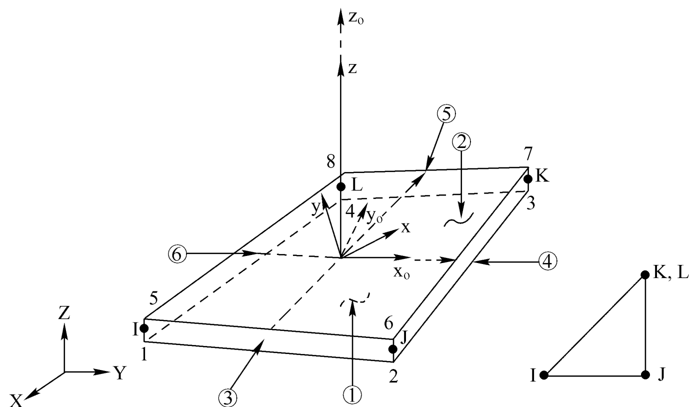


图 3-23　SHELL181 单元示意图

平面内壳的响应可认为是平面应力状态，因此对于壳单元不会出现体积锁定问题（当绝对不可压缩，泊松比 = 0.5 时 SHELL181 支持超弹性）。对于薄膜现象，壳单元的平面公式与平面实体单元的公式相似（非协调模式）。SHELL41、SHELL43、SHELL63 和 SHELL181 对于平面内变形支持非协调模式。SHELL181 也支持具有沙漏控制的一致缩减积分（默认选项）。

在进行线性分析时，如壳的厚度较小采用 SHELL63，SHELL63 单元不包含横向剪切效应。如横向剪切变形重要，对于均匀材料采用 SHELL43、SHELL93 或 SHELL143，对于复合材料采用 SHELL91、SHELL99、SHELL181。注意，具有一致缩减积分（默认）的 SHELL181 单元对大模型较快，但需要较细的网格。

进行非线性分析时，若模型具有等向强化塑性和超弹性，采用 SHELL181。其优势包括：较小的 .esav 文件；较少的 CPU 时间；压力荷载刚度效果；可以导入初始应力；厚度变化。若模型具有随动强化塑性或蠕变，采用 SHELL143、SHELL43 和 SHELL93。SHELL143 适用于小应变塑性，SHELL93 是弯曲的壳（高阶）。

7. 弹簧单元

弹簧单元是一类专门模拟弹簧行为的单元，不同于用结构单元（如 LINK 等）的模拟。此类单元用于一般弹簧时比较简单，而当具有控制作用时，则比较复杂。此类单元主要用于模拟铰销、轴向弹簧、扭簧及其控制行为，但都不考虑弯曲作用，且此类单元均无面荷载与体荷载。

常用的弹簧单元包括 COMBIN7、COMBIN14、COMBIN37、COMBIN39、COMBIN40，下面分别介绍。

COMBIN7 是三维销钉（或旋转）铰链单元，可在公共点上连接模型的两个或多个部分。该单元的功能包括连接柔度（或刚度）、摩擦、阻尼和一定的控制功能等。其中重要的一条就是大变形功能，这时局部坐标系固定于连接单元并随之移动。本单元适用于运动学静力分析和运动学动力分析。

COMBIN14 单元在一维、二维或三维应用中有轴向拉压或扭转的能力。轴向弹簧 – 阻尼器选项意味着单轴拉压单元，在每个节点上至多有 3 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平移，不考虑弯曲或者扭转。扭转弹簧 – 阻尼器选项意味着单纯的旋转单元，在每个节点上有 3 个自由度，即绕节点坐标系 X、Y、Z 轴的旋转，不考虑弯曲或者轴向荷载。弹簧 – 阻尼器单元没有质量，可利用适当的质量单元来增加质量。也可以不使用本单元的弹簧或阻尼功能。

COMBIN37 是一种具有开关功能的单向单元。本单元每个节点上有 1 个自由度：沿节点坐标方向的平动、绕节点坐标轴的旋转、压力或温度。具有更多功能（6 个自由度和大变形）的控制单元是 COMBIN7。本单元有许多应用，如用温度函数控制热流的温度调节器；用速度函数控制阻尼的机械减振器；用压力函数控制流动阻抗的安全阀；用位移函数控制摩擦的摩擦离合器等。

COMBIN39 是一种具有非线性功能的单向单元，可对此单元输入广义的力 – 变形曲线。该单元可以用于任何分析中。在一维、二维、三维应用中，本单元都有轴向或扭转功能。轴向选项表示轴向拉压单元，每个节点有 3 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y、Z 的平动，不考虑弯曲和扭转。扭转选项表示一个纯粹的旋转单元，每个节点有 3 个自由度，即绕节点坐

标轴 X、Y、Z 的转动，不考虑弯曲和轴向荷载。仅当每个节点有 2 个或 3 个自由度的时候，本单元才具有大位移的功能。本单元没有质量和热容量。

COMBIN40 是由弹簧滑块和阻尼器相并联，然后用串联的方式耦合到一个间隙上的组合体。质量可以分配到 1 个或 2 个节点上。本单元的每个节点有 1 个自由度：节点的平动、旋转、压力或温度。质量、弹簧、滑块、阻尼器和间隙可以被移走。本单元适用于任何分析。另一些具有阻尼器、滑块和间隙功能的单元包括 COMBIN7、LINK10、CONTAC12、COMBIN14、CONTAC26、MATRIX27、COMBIN37、COMBIN39、CONTAC48、CONTAC49 和 CONTAC52。

8. 质量单元

MASS21 是有多至 6 个自由度的点单元：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动。在每个坐标轴方向可以分配不同的质量和转动惯量。

MASS21 单元可以理解为通常意义上的质点，该单元只能使用集中荷载，支持弹性、大变形与单元生死。

9. 接触单元

接触单元是用来模拟两个实体间接触、摩擦行为的专用单元。ANSYS 提供了 3 种接触方式：点对点、点对面、面对面、线对线和线对面。

表 3-8 列出了常用的组合与相应的接触功能。

表 3-8 接触单元对

接触方式	点对点	点对面	面对面		线对线	线对面
接触单元	178	175	171，172	173，174	176	177
目标单元	—	169，170	169	170	170	170

下面比较常用的面对面单元对进行详细介绍。

CONTA171 用于表示二维“目标”面（TARGE169）和本单元所定义的变形面之间的接触和滑移状态。该单元每个节点有 2 个自由度：沿节点坐标系 X、Y 方向的平动。本单元位于无中间节点的二维实体、壳或梁单元（PLANE42、PLANE67、PLANE182、HYPER56、VISCO106、SHELL51、BEAM3、BEAM23、PLANE13、PLANE55 或 MATRIX50）表面，并与其依附的实体、壳或梁单元面有相同的几何特性。当单元表面穿透指定目标表面上的目标单元（TARGE169）时，接触状态开始。本单元允许处理库仑摩擦和剪应力摩擦状态。

CONTA172 用于表示二维“目标”面（TARGE169）和本单元所定义的变形面之间的接触和滑移状态。该单元每个节点有 2 个自由度：沿节点坐标系 X、Y 方向的平动。本单元位于有中间节点的二维实体单元（PLANE2、PLANE183、HYPER74、PLANE82、HYPER84（KEYOPT（1）=1）、VISCO88、VISCO108、PLANE35、PLANE77 或 MATRIX50）表面，并与其依附的实体单元面有相同的几何特性。当单元表面穿透指定目标表面上的目标单元（TARGE169）时，接触状态开始。本单元允许处理库仑摩擦和剪应力摩擦状态。

CONTA173 用于表示三维“目标”面（TARGE170）和本单元所定义的变形面之间的接触和滑移状态。该单元每个节点有 3 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。本单元位于无中间节点的三维实体或壳单元（SOLID5、SOLID45、SOLID46、SOLID64、SOLID65、SOLID69、SOLID70、SOLID185、HYPER58、HYPER86、VISCO107、SHELL28、SHELL41、

SHELL43、SHELL57、SHELL63、SHELL143、SHELL157、SHELL181 与 MATRIX50）表面，并与其依附的实体或壳单元面有相同的几何特性。当单元表面穿透指定目标表面上的目标单元（TARGE170）时，接触状态开始。本单元允许处理库仑摩擦和剪应力摩擦状态。

CONTA174 用于表示三维“目标”面（TARGE170）和本单元所定义的变形面之间的接触和滑移状态。该单元每个节点有 3 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。

本单元位于有中间节点的三维实体或壳单元（SOLID87、SOLID90、SOLID92、SOLID95、SOLID98、SOLID186、SOLID187、SOLID191、HYPER158、VISCO89、SHELL91、SHELL93、SHELL99 与 MATRIX50）表面，并与其依附的实体或壳单元面有相同的几何特性。当单元表面穿透指定目标表面上的目标单元（TARGE170）时，接触状态开始。本单元允许处理库仑摩擦和剪应力摩擦状态。

CONTA178 用于表示任何两种类型单元的任何两个节点之间的接触与滑移。该单元有 2 个节点，每个节点有 3 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。可以通过约束 UZ 自由度来模拟 2－D 和轴对称问题。此单元具有记录接触面间的法向应力和切向摩擦力的功能。可以在接触法向施加预荷载，也可以设置间隙。纵向阻尼也可以加入单元中。

TARGE169 与相关接触单元（CONTA171 和 CONTA172）联用，表示各种二维“目标”表面。接触单元覆盖于变形体边界的实体单元上，并可能与 TARGE169 定义的目标表面接触。该目标表面离散为一系列目标单元（TARGE169），并通过共享实常数号与相关接触表面配对。在目标单元上可以施加任意平动或旋转位移，也可施加力和力矩。对于刚性目标，这些单元可方便地模拟复杂的目标形状；对于柔性目标，这些单元覆盖于变形体边界的实体单元上。

TARGE170 与各种相关接触单元（CONTA173 和 CONTA174）联用，表示三维“目标”表面。接触单元覆盖于变形体边界的实体单元上，并可能与 TARGE170 定义的目标表面接触。目标表面离散为一系列目标单元（TARGE170），并通过共享实常数号与相关接触表面配对。在目标单元上可以施加平动或旋转位移，也可施加力和力矩。对于刚性目标，这些单元可方便地模拟复杂的目标形状；对于柔性目标，这些单元覆盖于变形体边界的实体单元上。

10. 矩阵单元

MATRIX27 代表一种任意的单元，单元的几何特性无定义，但其弹性运动学响应可用刚度、阻尼或质量系数来指定。本单元连接两个节点，每个节点有 6 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动和绕节点坐标系 X、Y、Z 轴的转动。

MATRIX50 将一组普通单元装配成一个单元。超单元一旦产生，就包含在 ANSYS 模型中，且可以应用于本单元允许的任何分析类型。超单元大大降低了许多分析的成本。一旦超单元矩阵形成，它们就被存储在一个文件中，而且可以用在其他的分析中，就像其他任何 ANSYS 单元被使用的方式一样。多荷载向量也可以存储于超单元矩阵，因此允许使用多种荷载。

两种矩阵单元的共同特点在于，这是一种抽象的分析工具，可以表示任意单元，只表示某一种抽象的、特定的物理性质。

11. 表面效应单元

SURF153 单元可用于各种荷载及表面效应之应用，可覆盖在任何二维结构实体单元（轴对称谐单元 PLANE25、PLANE83 和 FLUID81 除外）表面。本单元适用于二维结构分析，其几何模型如图 3-24 所示。

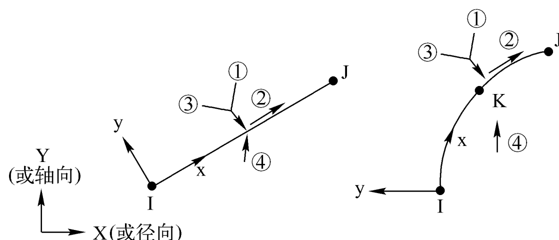


图 3-24 SURF153 单元示意图

SURF154 单元可用于各种荷载及表面效应之应用，可覆盖在任何三维单元表面。其几何模型如图 3-25 所示。该单元适用于三维结构分析，并可同时施加各种荷载和表面效应。

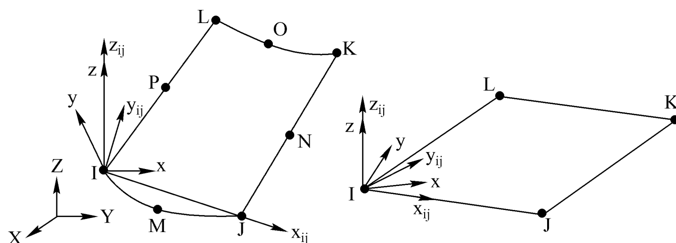


图 3-25 SURF154 单元示意图

12. 网格划分单元

MESH200 仅是用来划分网格的单元，与求解无关，如图 3-26 所示。它是为了实现多步网格划分而设计的。例如，拉伸，需要用低阶的网格划分来创建高阶的网格划分；用来划分二维或三维空间中（包括有或无中节点）的线或三维空间中（包括有或无中节点）的三角形或四边形的面；用来存储物理性质还没指定的单元。

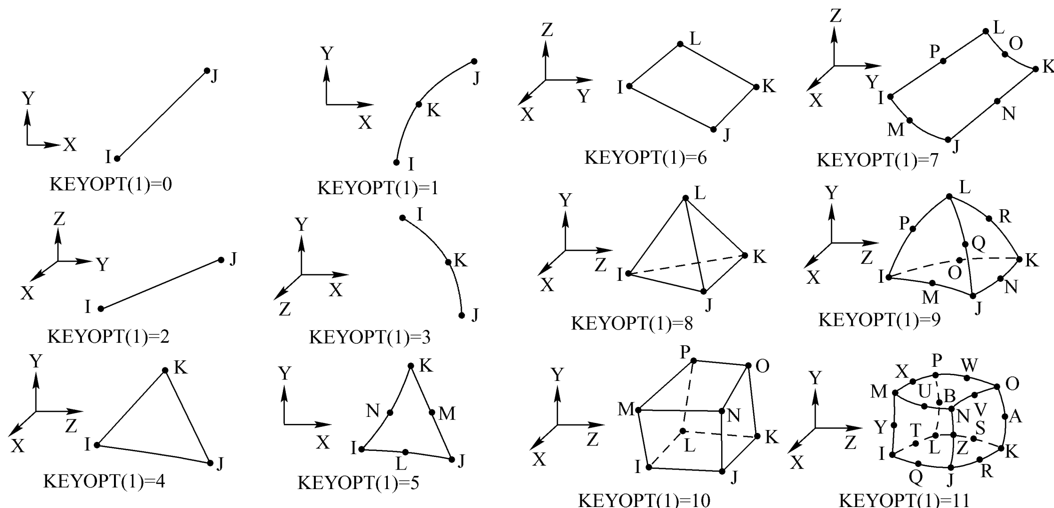


图 3-26 MESH200 单元的不同几何状态

MESH200 可以与任何其他 ANSYS 单元类型结合使用。当不再需要时，它能被删除，也可保留。它的存在并不会影响结果。

3.1.2 热单元

常用的热单元有 LINK33（三维传导杆）、PLANE55（二维热实体）、SHELL57（热壳）、SOLID70（三维热实体）、SHELL131（4 节点热层壳单元）、SHELL132（8 节点热层壳单元）等。

LINK33 是用于节点间热传导的单轴单元，如图 3-27 所示。该单元每个节点只有 1 个温度自由度。热传导杆单元可用于稳态或瞬态的热分析问题。如果包含热传导杆单元的模型还需要进行结构分析，该杆单元可被一个等效的结构单元代替。

PLANE55 可作为一个具有二维热传导能力的平面或轴对称环单元使用，如图 3-28 所示。该单元有 4 个节点，每个节点只有 1 个温度自由度。该单元可用于二维稳态或瞬态热分析问题，并可以补偿由于恒定速度场带来的质量输运热流。如果包含热单元的模型还需要进行结构分析，该单元应当被一个等效的结构单元（如 PLANE42）代替。

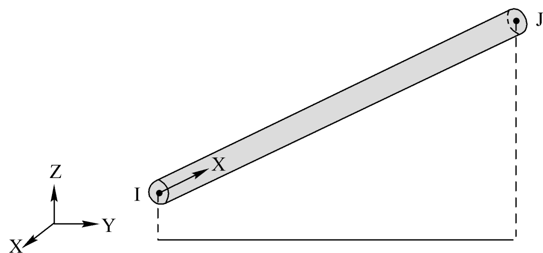


图 3-27 LINK33 单元示意图

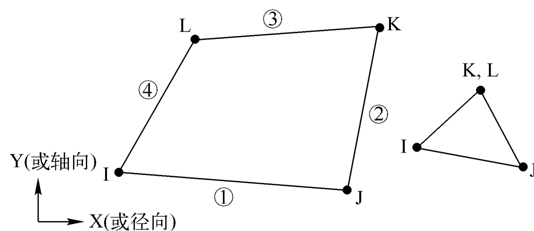


图 3-28 PLANE55 单元

SHELL57 是一个三维的、具有面内导热能力的单元，如图 3-29 所示。该单元有 4 个节点，每个节点只有一个温度自由度。该热壳单元可用于三维的稳态或瞬态热分析问题。如果包含热壳单元的模型还需要进行结构分析，可用一个等效的结构单元（如 SHELL63）来代替该单元。如果面内及横向上的导热都需要考虑的话，则需要使用热实体单元（如 SOLID70 或 SOLID90）。

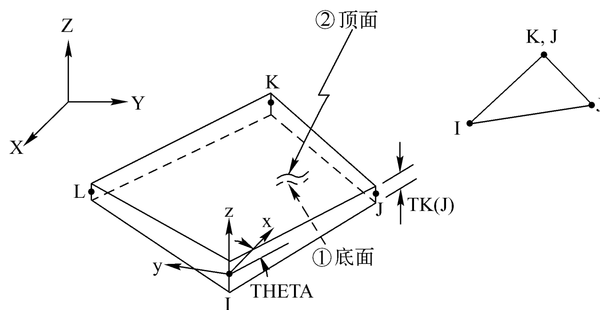


图 3-29 SHELL57 单元示意图

SOLID70 是一个具有导热能力的单元，如图 3-30 所示。该单元有 8 个节点，每个节点只有一个温度自由度。该单元可用于三维的稳态或瞬态热分析，并可以补偿由于恒定速度场质量运输带来的热流损失。如果包含导热实体单元的模型还需要进行结构分析，该单元应当

被一个等效的结构单元（如 SOLID45）所代替。此单元存在一个选项，可用来模拟通过多孔介质的非线性稳态流动。使用这一选项时，原有的热参数被解释成类似的流体流动参数。例如，温度自由度等效为压力自由度。

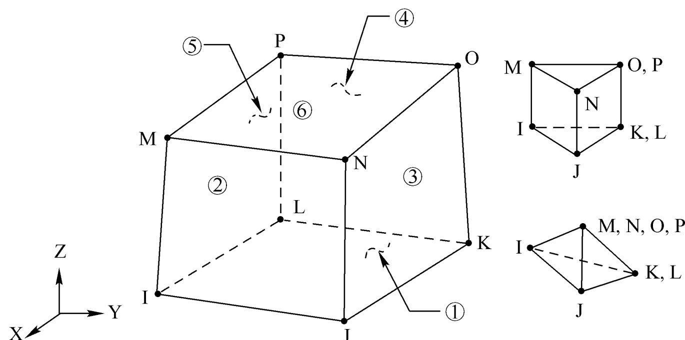


图 3-30 SOLID70 单元示意图

3.1.3 电磁单元

常用的电磁单元有 SOURC36（电流源）、SOLID97（三维磁实体）、SOLID122（三维二十节点静电实体）、CIRCU124（通用电路）、SOLID123（三维十节点四面体静电实体）等。

SOURC36 是一个用于为磁场提供电流源数据的原始组件（由预定几何体组成），如图 3-31 所示。该单元描述了在一个应用标量势列式（MAG 自由度）模型中的电流分配。这些电流被用于数值积分技术（包括 Biot - Savart 定律）来计算磁场强度（Hs）。Hs 在公式中被作为模型的磁荷载。

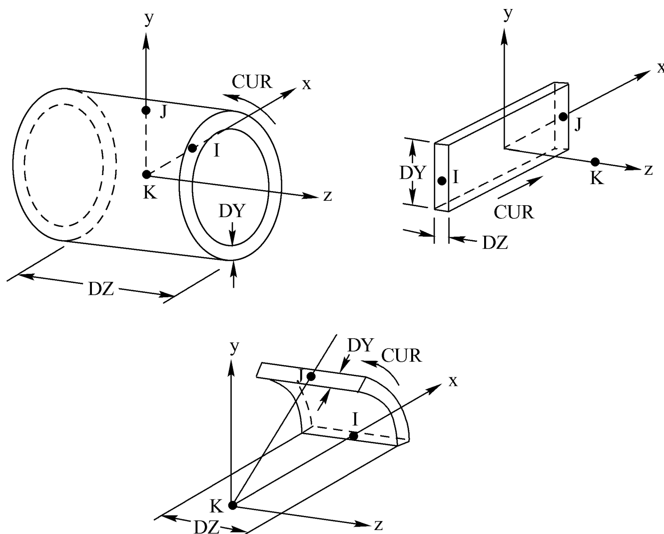


图 3-31 SOURC36 单元

SOLID97 用于模拟三维磁场，如图 3-32 所示。该单元由 8 个节点定义，在已定义的 6 个自由度之外尚有 5 个自由度，分别是磁向量势能（AX、AY、AZ）、电标量势能

（VOLT）、电流（CURR）和电动势（EMF）。SOLID97 基于以库伦为度量的磁向量势能方程，可用于静磁、涡流（AC 时间谐波和瞬态分析）以及电动势磁场（静态、AC 时间谐波和瞬态分析）和电磁环路耦合场（静态、AC 时间谐波和瞬态分析）等低频磁场分析。对模拟 B－H 曲线或永久消磁曲线，该单元具有进行非线性磁场分析的功能。

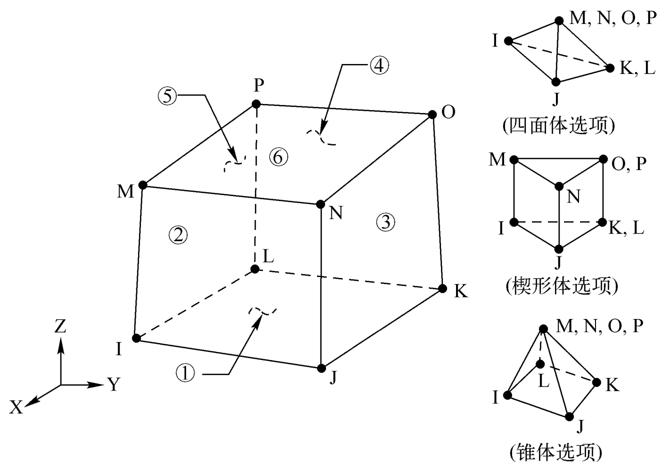


图 3-32　SOLID97 单元

SOLID122 是一个三维 20－节点实体单元，如图 3-33 所示。在每个节点上有一个电势自由度。它可以容忍不规则的形状而没有太大的精度损失。SOLID122 单元有协调的电势形状并能很好地模拟弯曲的边界，可用于三维静电场分析。

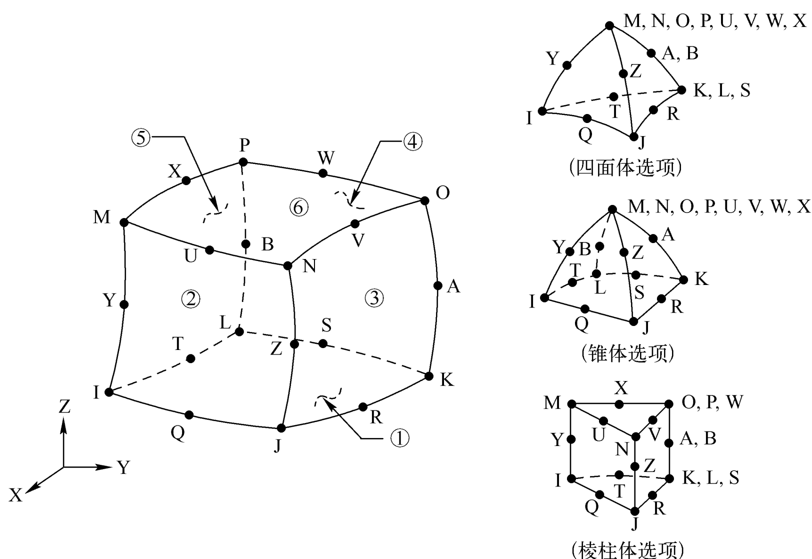


图 3-33　SOLID122 单元

CIRCU124 单元是一个通用的电路单元，用于模拟电路，如图 3-34 所示。此单元可以与电磁有限元相结合来模拟耦合电磁环路场的相互作用。该单元有 6 个节点来定义环路组

元，每个节点有 3 个自由度来模拟环路响应。对电磁环路场耦合，该单元可以与二维和三维电磁场单元 PLANE53 和 SOLID97 相连接。CIRCU124 单元可用于静态、谐波和瞬态分析。

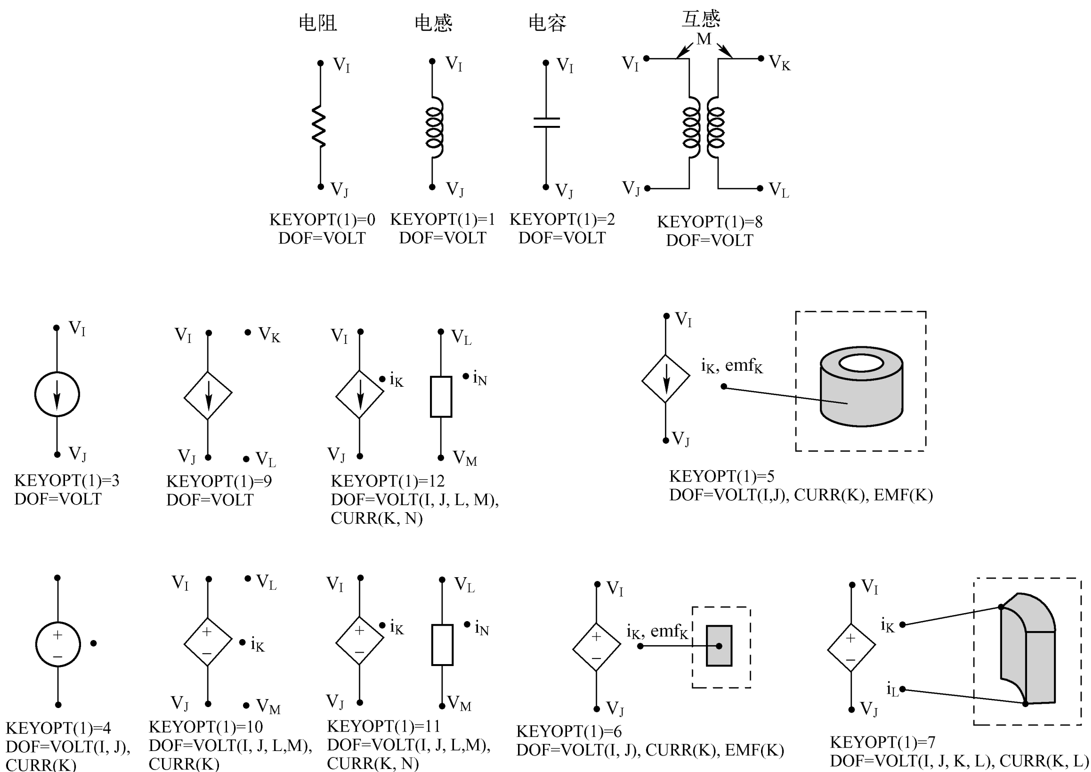


图 3-34　CIRCU124 单元

TRANS126 代表将能量从静电场转换到结构场的转换单元，同时也允许能量贮存，如图 3-35 所示。在结构有限元分析及机电环路模拟中，此单元完全耦合机电场并描述一个匹配的降阶模型。在每个节点上有 2 个自由度：在节点 X、Y 或 Z 方向上的平移和电势（VOLT）。该单元用于模拟微机电设备（MEMS）的机电响应，如静电蜂巢驱动器、电容传感器和 RF 开关。单元的特征可从应用静电单元 PLANE121、SOLID122、SOLID123、SOLID127、SOLID128 及 CMATRIX 宏的机电设备的静电场模拟中导出。TRANS126 单元描述了

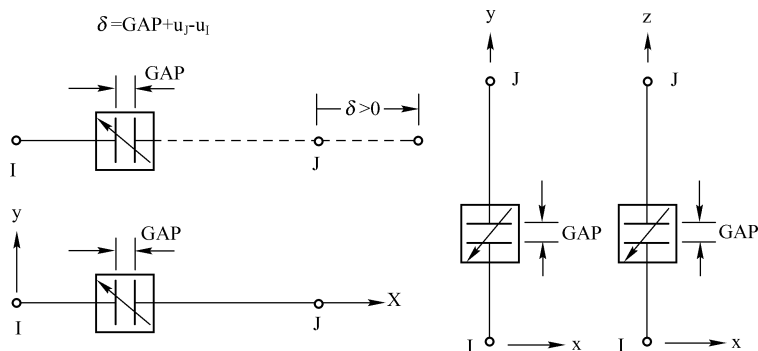


图 3-35　TRANS126 单元

设备在一个方向上运动的电容响应。运行一系列静电模拟并导出电容（CMATRIX 命令）作为冲程（或挠度）的函数可以给这个单元提供必要的输入。电容与冲程的关系可描述在这个传感器单元中用于模拟的设备的“降阶”的特性。从一系列静电模拟中可得出 3 个方向的（X、Y 或 Z）特性，创建 3 个独立的传感器单元来反映设备的整体平动响应。

TRANS126 单元的变形－电容关系如图 3-36 所示，变形－力关系如图 3-37 所示。

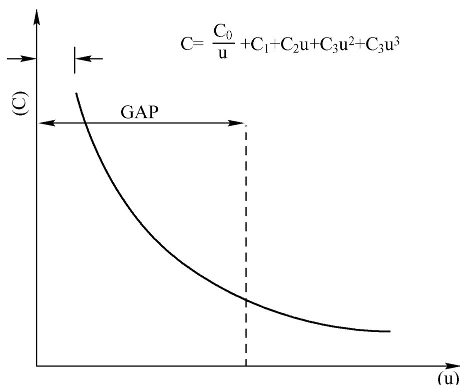


图 3-36　TRANS126 单元变形－电容曲线

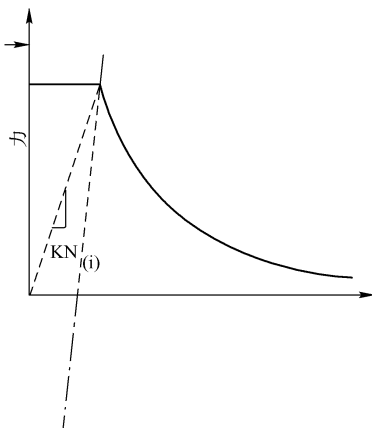


图 3-37　TRANS126 单元变形－力曲线

3.1.4 耦合场单元

常用的耦合场单元有 SOLID226（三维耦合场实体）、PLANE223（二维耦合场实体）、SOLID62（三维磁－结构实体）、PLANE67（二维热－电实体）、LINK68（热－电线单元）、SOLID98（四面体耦合场实体）、TRANS126（机－电传感器单元）、SHELL157（耦合热－电壳）等。

LINK68（见图 3-38）是一个三维空间中的单轴单元，能够在节点间传导热和电流。由电流流动生成的焦耳热也包括在热平衡中。每个节点有 2 个自由度，即温度和电压。尽管不包括瞬态电容或电感系数，该单元也可用于稳态和瞬态热分析。该单元是线性的，但在热求解中需要迭代解法来包括焦耳热效应。如果没有电效应，可用传导杆单元（LINK33）。如果包括热－电单元的模型也被用于结构分析，应用等效结构单元代替。

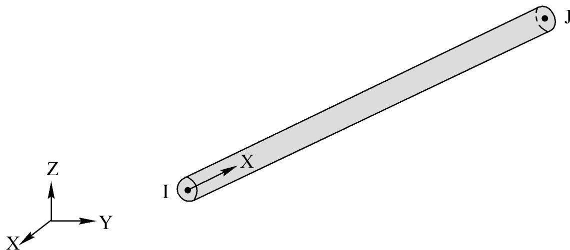


图 3-38　LINK68 单元

SHELL157（见图 3-39）是三维有面内热和电传导能力的单元。该单元有 4 个节点，每个节点有 2 个自由度，即温度和电压。尽管没有包括瞬态电容或自感应效应，该单元也可用

于三维稳态或瞬态热分析。该单元需要进行迭代求解以便在热分析中包括焦耳热效应。如果没有电效应，可用二维热实体单元（SHELL57）。如果包含热－电单元的模型需要进行结构分析，则将该单元用相应的结构单元来代替（如 SHELL63）。如果面内和横向热－电传导都需要，则使用热－电实体单元（SOLID69）。

SOLID98（见图 3-40）是一种 10 节点的四面体单元，它是 8 节点 SOLID5 的高阶单元。该单元存在二次位移形函数，适合建立不规则的网格模型（如由各种 CAD/CAM 系统生成的网格模型）。本单元由 10 个节点定义，每个节点有 6 个自由度。单元的详细特性参见《ANSYS 单元手册》。

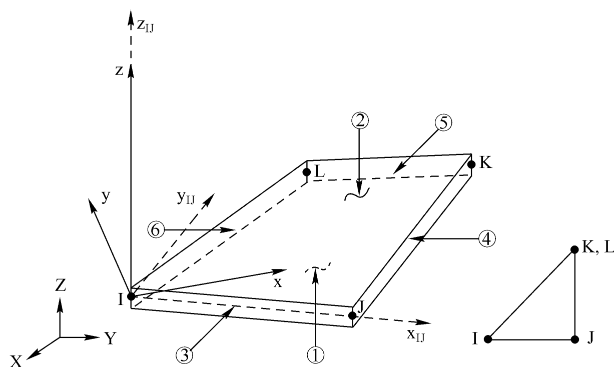


图 3-39 SHELL157 单元

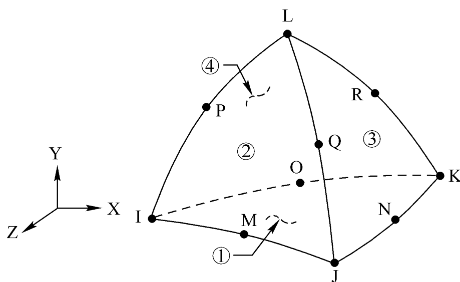


图 3-40 SOLID98 单元

3.1.5 流体单元

常用的流体单元有 FLUID29（二维声学流体）、FLUID30（三维声学流体）、FLUID116（热－流管单元）、FLUID129（二维无限声学单元）、FLUID130（三维无限声学单元）、FLUID141（二维流体－热）、FLUID142（三维流体－热）等。

FLUID30 用于模拟流体介质及流体/结构相互作用的界面，如图 3-41 所示。典型的应用包括声波的传播和水下结构动力学。声学的控制方程，又称为三维波动方程，被离散用以考虑声压和结构运动在界面上的耦合。该单元有 6 个节点，每个节点有 4 个自由度，即 X、Y、Z 方向的平动和压力，但只有在界面上节点的平动才有效。该单元可包括界面上吸收材料的声波衰减。该单元可与其他三维结构单元一起使用，完成非对称或阻尼模态的全谐波响应和全瞬态法分析。当没有结构移动时，该单元也可用于静态的、模态和衰减谐波响应分析。

FLUID130 是作为 FLUID30 单元的配套单元而开发的，如图 3-42 所示。在用 FLUID30 单元建立模型后，可用该单元作为封套。它模拟了流体域扩展到 FLUID30 有限元域的边界外的无限流体域的吸收效果。FLUID130 单元作为二阶的吸收边界条件，传出的压力波到达模型边界时将被“吸收”，只有微量反射回流体域。该单元可被用作三维流体域的边界。它是一个平面表面单元，有 4 个节点，每个节点只有 1 个压力自由度。FLUID130 可用于瞬态、谐波及模态分析。典型应用包括结构声学、噪声控制、水下声学等。

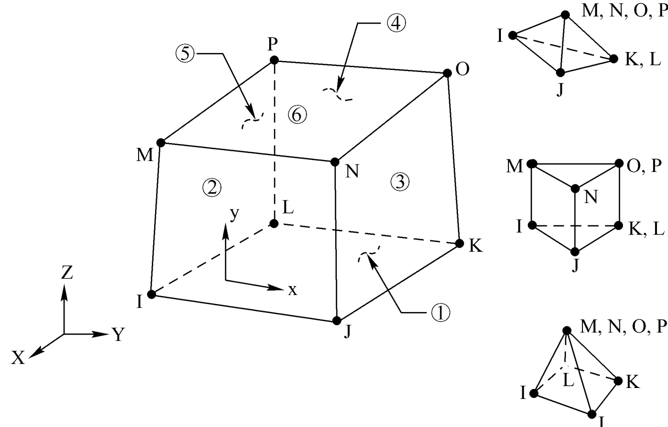


图 3-41　FLUID30 单元

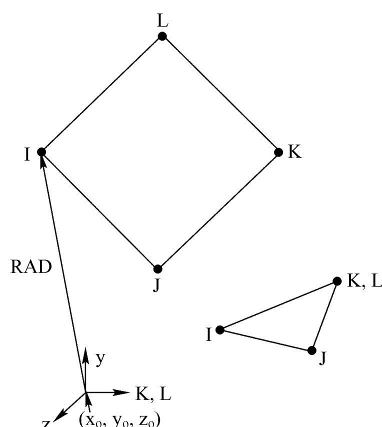


图 3-42　FLUID130 单元

3.2　单元属性的设置

每个单元都有与之相关的属性：单元类型（TYPE）、实常数（REAL）、材料属性（MAT）。

只要模型中有多种单元类型（TYPEs）、实常数（REALs）和材料（MATs），就必须确保给每一种单元指定了合适的属性。有以下 3 种途径。

- 在网格划分前为实体模型指定属性。
- 在网格划分前对 TYPE、REAL 和 MAT 进行“总体的”设置。
- 在网格划分后修改单元属性。

3.2.1 单元类型（TYPE）

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Types（单元类型）对话框，如图 3-43 所示。

在该对话框下方有 3 个按钮，Add 按钮、Options 按钮、Delete 按钮，分别用于添加单元、设定单元特性以及删除单元。通常只用到添加单元，因此单击 Add 按钮，弹出如图 3-44 所示 Library of Element Types 对话框。

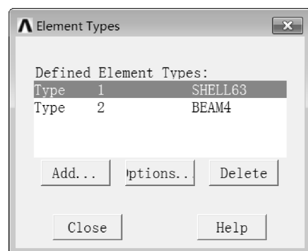


图 3-43　Element Types（单元类型）对话框

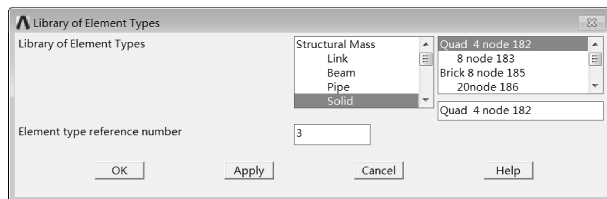


图 3-44　Library of Element Types 对话框

以 PLANE182 单元为例，选择 Solid > Quad 4 node 182 单元，单击 OK 按钮，即可完成添加。此单元有多项功能，假设现在需要进行一个平面应变问题的分析，则可以为其设置单元特性。回到 Element Types 对话框，选择 PLANE182，单击 Options 按钮，弹出 PLANE182 element type options 对话框，将 K3 设置为 Plane strain，单击 OK 按钮，如图 3-45 所示。

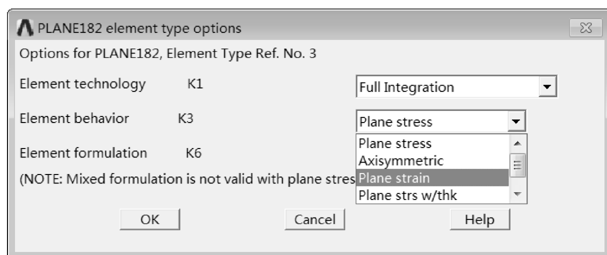


图 3-45 设置单元属性

提示：通常一个分析模型需要多种单元类型，均按此种方法添加。

3.2.2 实常数（REAL）

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete，在弹出的 Real Constants 对话框中可以进行实常数的添加、编辑及删除。在此以 PLANE182 单元为例，添加 PLANE182 单元，然后对其进行实常数设置。在该对话框中单击 Add 按钮，在弹出的对话框中选择 PLANE182，单击 OK 按钮，弹出 Real Constant Set Number1, for PLANE182 对话框，如图 3-46 所示。其中，第 1 个输入框用于设置实常数的编号；第 2 个输入框用于设置单元的截面积。

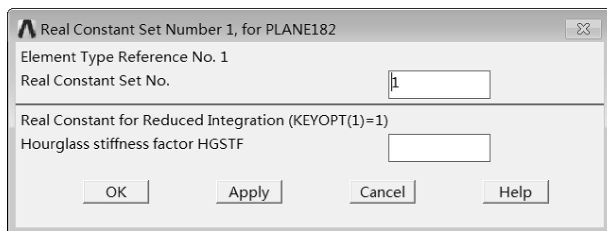


图 3-46 设置实常数

对于不同类型的单元，实常数的各项代表的意义不同。例如，LINK 单元的实常数通常为杆件的截面积、线密度等；SHELL 单元可通过实常数设定板、壳厚度；对于弹簧单元，则可设置弹簧刚度。

3.2.3 材料属性（MAT）

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，如图 3-47 所示。左侧 Material Models Defined 列表框中显示了当前已定义的材料信息，右侧 Material Models Available 列表框则为设定各种材料的材料库。

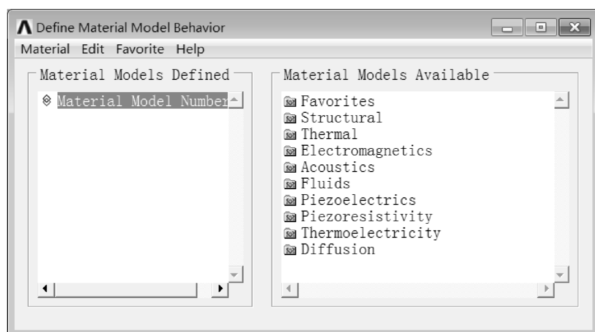


图 3-47 Define Material Model Behavior 对话框

通过该对话框，可以设定分析中所需的各种材料属性及参数。ANSYS 材料库提供了丰富的材料，此处列举一些结构力学分析中常用的材料属性。

在 Matevial Models Available 列表框中选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，双击打开线弹性参数设置对话框，从中可设定弹性模量 EX、泊松比 PRXY。同样，在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Density，双击打开密度参数设置对话框，从中可以添加材料的密度。

3.2.4 截面特性设置（SECTION）

以 BEAM 单元为例，生成一空心圆截面梁。

（1）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Beam > Common Sections 命令，在弹出的 Beam Tool 对话框中，设置 ID 为 1，Sub－Type（截面类型）选择空心圆管，Ri =350，Ro =450，然后单击 OK 按钮，如图 3-48 所示。

（2）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS，在弹出的对话框中设置 N1 =0,0,0，N2 =5000,0,0，单击 OK 按钮，生成 5 m 长梁的两端节点。

（3）通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes，生成梁。

（4）此时的梁模型只是一条直线。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Style > Size and Shape 命令，在弹出的 Beam Tool 对话框中按照图 3-48 所示进行设置，然后单击 OK 按钮，得到梁单元模型如图 3-49 所示。

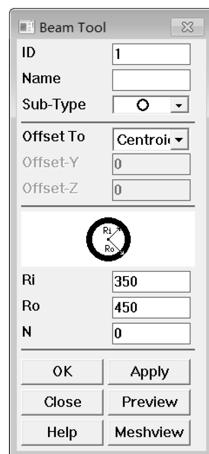


图 3-48 Beam Tool 对话框

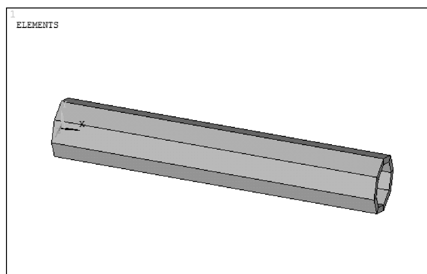


图 3-49 梁模型

3.3 本章小结

本章系统讲解了 ANSYS 的单元体系，理解单元类型与不同单元的特性，是进行计算前最为重要的准备工作之一。

单元类型的确定影响整个计算的正确性。在有限元数值求解中，单元的等效节点力、刚度矩阵、质量矩阵等均用数值积分生成，连续体单元以及壳、板、梁单元的面内均采用高斯（Gauss）积分，而壳、板、梁单元的厚度方向采用辛普生（Simpson）积分。辛普生积分点的间隔是一定的，沿厚度分成奇数积分点。由于不同单元的刚度矩阵不同，采用数值积分的求解方式不同，因此实际应用中一定要采用合理的单元来模拟求解。



第4章 网格划分

在上一章中讲解了ANSYS的单元系统及如何对单元的属性进行控制，本章将讲解如何进行网格的划分，也就是将上一章所讲述的各种类型的单元的属性（包括模拟的物理特性以及计算中的数学特性）赋予几何模型，以控制模型的属性，使其表现出尽可能接近实际工况的特征。

本章学习目标

- 理解网格控制与单元属性的关系
- 掌握各种划分网格的方法
- 掌握编辑网格的方法

4.1 网格的控制

网格数量的多少将影响计算结果的精度和计算规模的大小。一般来讲，网格数量增加，计算精度会有所提高，但同时计算规模也会增加。因此，在确定网格数量时应权衡、综合考虑。

4.1.1 智能网格划分

对初学者而言，有一种快捷的网格划分方式，那就是利用ANSYS提供的MeshTool工具划分网格。

在GUI界面中选择Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool命令，弹出图4-1所示的MeshTool（网格划分工具）对话框。

勾选Smart Size复选框，即可通过拖动滑块调整网格的尺寸级别，范围为1（精细）~10（粗糙），默认级别为6。

在Size Controls（尺寸控制）选项组中，可就上述操作是针对Global、Areas、Lines、Layer、Keypts等进行设置。

此外，在GUI界面中选择Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Smart Size > Adv Opts…命令，在弹出的图4-2所示Advanced SmartSize Settings对话框中可进行高级的智能网格控制，如对网格扩张和过渡系数等进行设置。

不同的网格划分尺寸级别如图4-3所示。

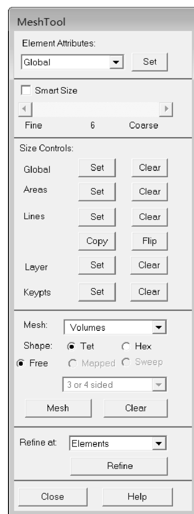


图 4-1 MeshTool 对话框

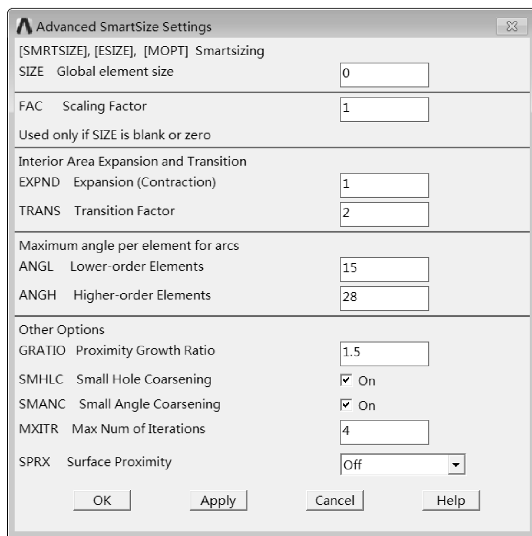


图 4-2 Advanced SmartSize Settings 对话框

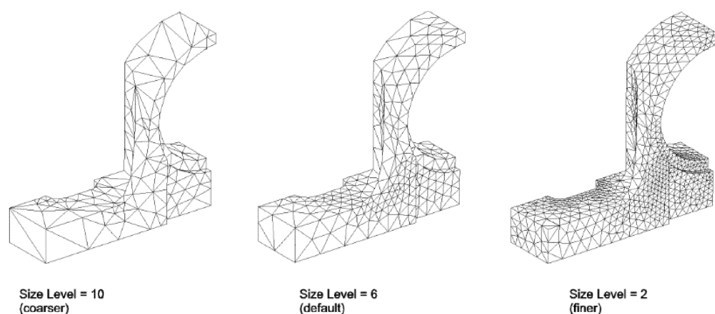


图 4-3 不同的网格划分尺寸级别

4.1.2 全局单元尺寸控制

全局单元尺寸控制能为整个模型指定最大的单元边长，或指定每条线被分成的份数。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool 命令，在弹出的 MeshTool 对话框的 Size Controls 选项组中单击 Global 右侧的 Set 按钮，弹出图 4-4 所示的 Global Element Sizes 对话框（也可通过选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Global > Size 命令来打开）。

在该对话框中，SIZE Element edge length 框用于输入最大的单元边长，NDIV No. of element divisions 框用于输入每条线被分成的份数，两者只需要指定其一即可。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Global > Other 命令，在弹出的图 4-5 所示 Other Global Sizing Options 对话框中可进行更多的设置。

提示：以上操作也可由 ESIZE 或 SIZE 命令来完成。单独使用 ESIZE 命令时（关闭智能划分网格功能），将采用相同的单元尺寸对体或面划分网格；若与智能划分网格功能一同使用，ESIZE 会起到引导作用，但为了适应线的曲率或几何近似指定的尺寸可能无效。

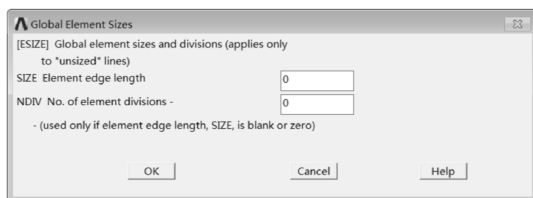


图 4-4 Global Element Sizes 对话框

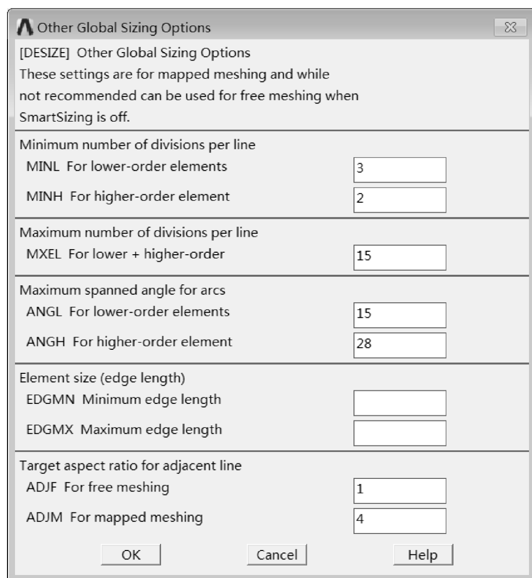


图 4-5 Other Global Sizing Options 对话框

4.1.3 关键点尺寸控制

关键点尺寸控制是指通过关键点控制单元尺寸。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool 命令，在弹出的 MeshTool 对话框的 Size Controls 选项组中单击 Keypts 右侧的 Set 按钮，弹出 Element Size at Picked Keypoints 对话框。

在工作区中拾取要控制的关键点，单击 OK 按钮，弹出 Element Size at Picked Keypoints 对话框，从中可以进行相应的尺寸设置，如图 4-6 所示。

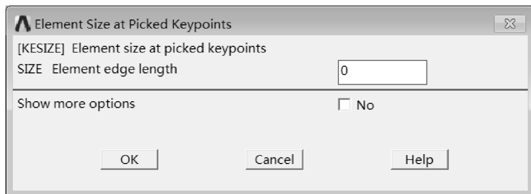


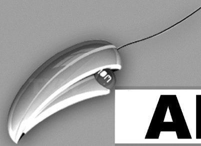
图 4-6 Element Size at Picked Keypoints 对话框

提示：不同的关键点可以设置不同的尺寸，为网格控制提供更多的便利，特别是在结构的应力集中区。当智能网格划分功能打开时，为了适应线的曲率或几何近似指定的尺寸可能无效。

4.1.4 线尺寸控制

线尺寸控制是指通过线控制单元尺寸。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool 命令，在弹出的 MeshTool 对话框的 Size Controls 选项组中单击 Lines 右侧的 Set 按钮，弹出图 4-7 所示的 Element



Size on Picked Lines 对话框。

在工作区中拾取要控制的线，单击 OK 按钮，弹出 Element Sizes on Picked Lines 对话框，从中可以进行相应的线尺寸设置，如图 4-8 所示。

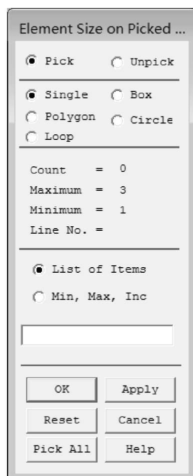


图 4-7　Element Size on Picked Lines 对话框

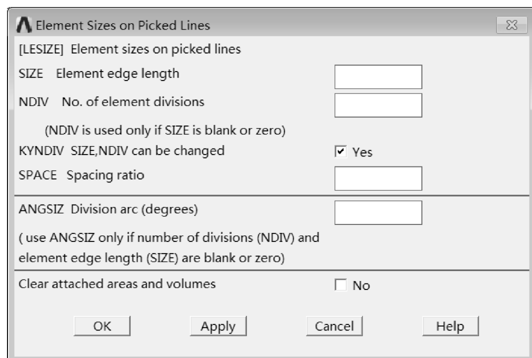


图 4-8　Element Sizes on Picked Lines 对话框

提示：用户可以为不同的线指定不同的尺寸。指定的尺寸可以是强的或弱的，区别在于强的尺寸可以在智能网格划分功能打开时使用户指定的尺寸优先，而弱的尺寸在智能网格划分功能打开时可能无效，以智能网格划分程序优先。

下面以一地基刚性基础为例说明借助于线的网格尺寸控制，如图 4-9 所示。

在 MeshTool 对话框的 Element Attributes（单元属性）下拉列表框中选择 Lines，然后单击其右侧的 Set 按钮，弹出 Line Attributes 对话框。拾取模型中控制直线，选中的阶梯部分直线（如图 4-10 所示的虚线部分），会弹出图 4-11 所示的 Line Attributes 对话框。

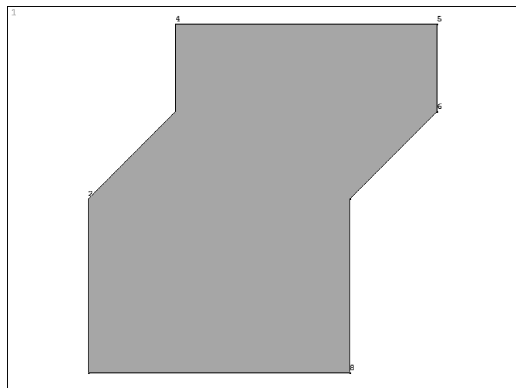


图 4-9　几何模型

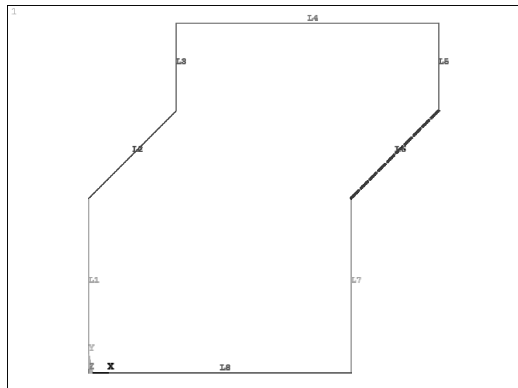


图 4-10　直线控制尺寸

在 Line Attributes 对话框中的 TYPE Element type number 下拉列表框中选择 4 SHELL181，单击 OK 按钮，完成单元类型设置。

在 MeshTool 对话框中，设置 Mesh 为 Areas，Shape 为 Quad，类型为 Free，单击 Mesh 按

钮，拾取面，完成网格划分。

完成划分操作后，在 GUI 界面中选择 Utility > Plot > Elements 命令，划分结果应如图 4-12 所示。

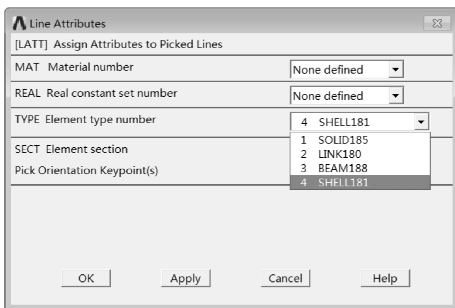


图 4-11 Line Attributes 对话框

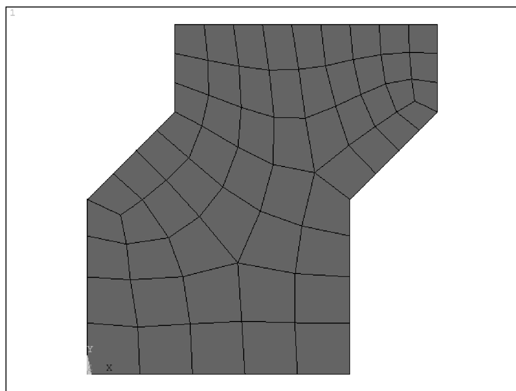


图 4-12 划分网格后

4.1.5 面尺寸控制

面尺寸控制是指通过面控制单元尺寸。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool 命令，在弹出的 MeshTool 对话框中的 Size Controls 选项组中单击 Areas 右侧的 Set 按钮，弹出 Element Size at Picked Areas 对话框。

在工作区中拾取要控制的面，单击 OK 按钮，弹出 Element Size at Picked Areas对话框，从中可以对面的尺寸进行相应的设置，如图 4-13 所示。

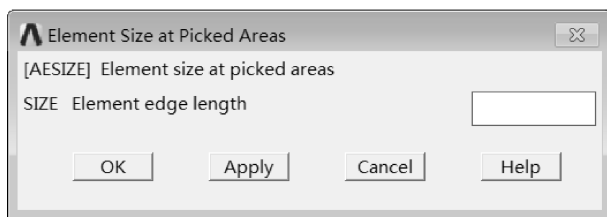


图 4-13 Element Size at Picked Areas 对话框

提示：用户可以为不同的面定义不同的尺寸。面与面的交线仅在未指定线尺寸与关键点尺寸且邻近无尺寸更小的面时使用指定的尺寸。当智能网格划分功能打开时，为了适应线的曲率或几何近似指定的尺寸可能无效。

4.2 简单网格划分实例

本节以 2.3 节建立的带孔矩形板模型为例，说明网格划分的具体操作步骤。

模型基本参数：板厚度为 25 mm，长为 200 mm，宽为 150 mm，圆孔半径 10 mm，弹性模

量 $E=20$ GPa，泊松比 $\mu=0.3$。

4.2.1 几何模型的导入

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > File > Resume from 命令，如图 4-14 所示；导入 2.3 节中完成的建模结果，采用前视图，导入的几何模型如图 4-15 所示。

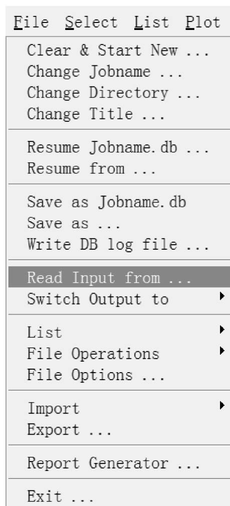


图 4-14 导入模型路径

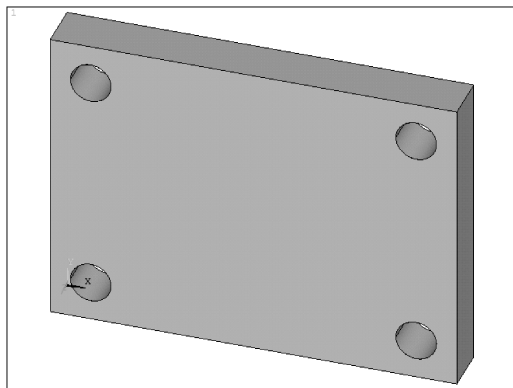


图 4-15 导入的几何模型

4.2.2 定义单元属性

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，在弹出的对话框中选择 SOLID185。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，进行材料模型设置。选取各向同性的线弹性模型（Structural > Linear > Elastic > Isotropic），设置弹性模量 EX = 20e9，泊松比 PRXY = 0.3。

提示：本例中的模型是单一材料。若为多种不同材料，则在此步中需设置不同材料及模型属性，在稍后的步骤中将其赋予对应的部分即可。

4.2.3 网格的控制

在划分网格前，要对网格的控制参数进行设置。

1. 设置单元尺寸

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool 命令，弹出 MeshTool 对话框，如图 4-16 所示。

在 Element Attributes 下拉列表框中选择 Global，单击其右侧的 Set 按钮，进行单元类型选择。在 Size Controls 选项组中单击 Global 右侧的 Set 按钮，在弹出的 Global Element Sizes 对话框中进行网格尺寸设置，如图 4-17 所示。

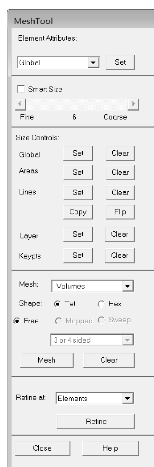


图 4-16 MeshTool 对话框

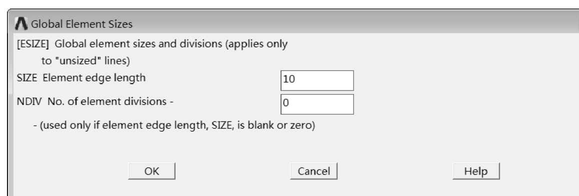


图 4-17 Global Element Sizes 对话框

设置完成后，在 MeshTool 对话框中直接单击 Mesh 按钮，弹出拾取对话框后用鼠标单击拾取模型，单击 OK 按钮，完成网格的划分。

不同的网格尺寸，对应不同网格密度，网格越密后期分析越精确，但相应耗费也越大。对比效果如图 4-18 和图 4-19 所示。

此外，也可以通过 Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size 进行网格尺寸设置，然后通过 Preprocessor > Meshing > Mesh 执行网格划分。

2. Smart Size 设置

在图 4-16 所示 MeshTool 对话框中，若勾选 Smart Size 复选框，或在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Smart Size > Adv Opts…命令，通过弹出的 Advanced Smartsize Setring 对话框进行网格的自动划分设置，则系统将根据所选的精度等级进行自动划分。

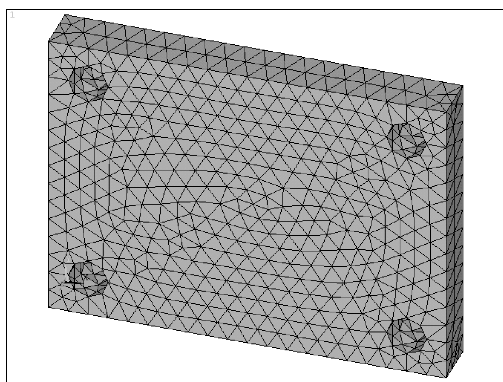


图 4-18 模型网格 Element Edge Size = 10

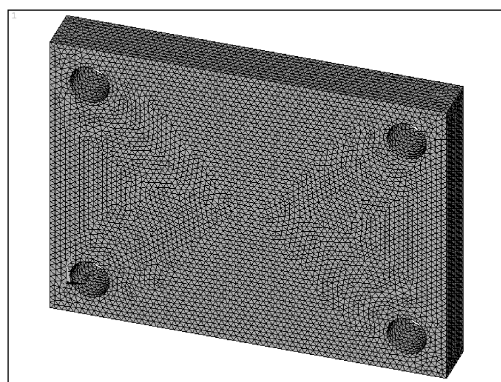


图 4-19 模型网格 Element Edge Size = 3

Smart Size 由 1（Fine）到 10（Coarse）共 10 级，表示由精细到粗糙的 10 个不同等级。默认级别为 6。

此时，设置的 Element Edge Size 值起指导作用，而精度等级的差异也很明显。

如图 4-20 和图 4-21 所示，二者精度相差很明显。

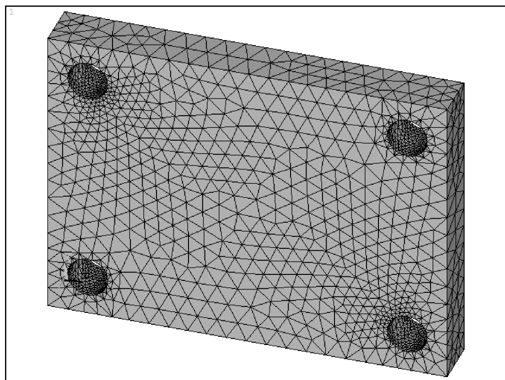


图 4-20　Size 10 精度 3

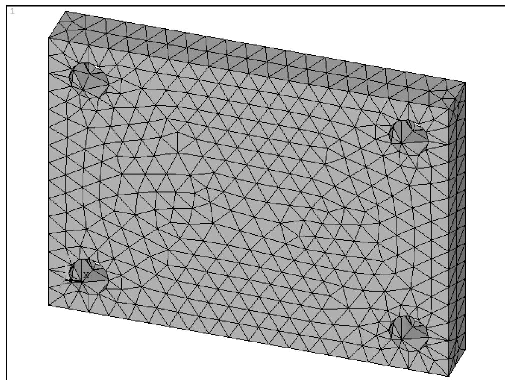


图 4-21　Size 10 精度 8

而如图 4-22 和图 4-23 所示的情况，由于本身尺寸就很精确，因此板体精度差异不是很明显，但是在孔洞处可以明显看出精度差异。

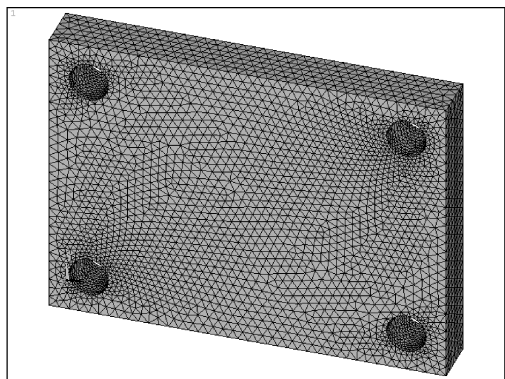


图 4-22　Size 5 精度 3

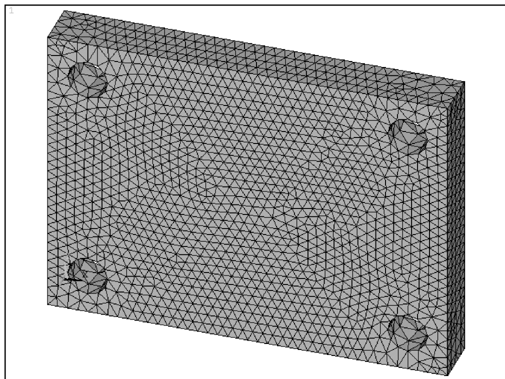


图 4-23　Size 5 精度 8

可见，精度等级较高时，系统自动在形状改变时做出更精确的划分；而精度较低时，圆孔沿周长划分的网格长度与矩形边沿周长划分的网格边沿长度一致，这显然是不够准确的。

4.2.4 网格的清除

若对划分的网格不满意，想重新划分，则可使用 Clear 清除网格。以本例来说，在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Clear > Volumes 命令（见图 4-24），即可清除体上的网格。此外，也可以在 MeshTool 对话框中直接单击 Clear 按钮进行清除操作。

此时，清除的对象将根据之前 Mesh 的组成对象而有所不同。若之前 Mesh 的组成对象是 Volumes，则弹出 Clear Volumes 对话框，如图 4-25 所示。

同理，若是面或线，则弹出相应的对话框，然后进行拾取即可。

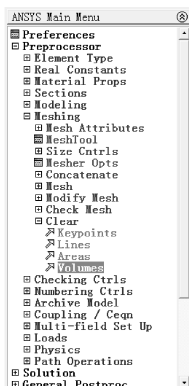


图 4-24　清除网格命令

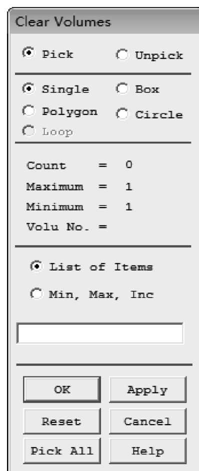


图 4-25　Clear Volumes 对话框

4.2.5 局部网格

在某些需要局部细化的网格划分中，可以通过 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At 进行加细操作。

图 4-26 所示为 Globe Size 10 时选择上边线细化的划分效果，从中可以看出上边线的网格尺寸明显比较小（在此上边线划分等级为 3 级）。

提示：如基于某条直线进行细化，则可选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Lines，单击拾取直线，进行划分等级设置，由 1 级（Min）至 5（Max）级，等级越高划分越细。

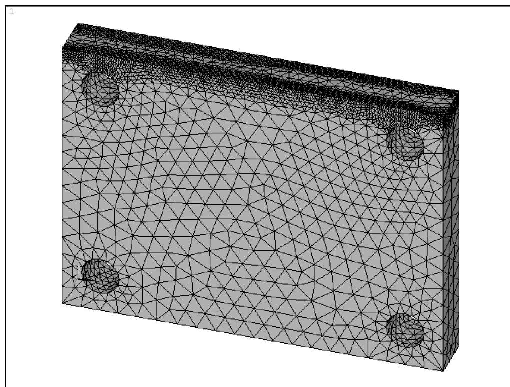


图 4-26　沿线细分网格

4.3　通过拉伸生成网格

在 2.2 节的自底向上建模中，曾经学习了将几何面拉伸成几何体的操作。同样，在对一个几何面划分网格后，也可以将生成的有限元面拉伸成体，这样与面平行方向的网格都同源面上的网格划分一致，而拉伸方向的网格数可以由用户指定。

通过拉伸生成网格，首先要定义两种单元，即面单元与体单元。

面单元可选用 MESH200，这是一种仅用于划分网格而不参与求解的单元；也可以选择 PLANE 单元。体单元应与面单元相匹配，如果面单元有中间节点，体单元也应具有中间节点。

下面通过一个实例说明如何进行单元拉伸操作。模型基本参数：$b \times h = 200 \times 200$，小方孔 50×50，相邻两方孔间隔 50，4 个孔对称分布。

建立图 4-27 所示的面。

进入前处理器，设置单元类型为 MESH200，设置 Keypot（1）为 QUAD 8 - NODE。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，在弹出的对话框中选择 Not Solved、Mesh Facet 200，单击 OK 按钮。

单击 Option 按钮，在弹出的对话框中设置 K1 为 QUAD 8 - NODE，单击 OK 按钮。打开 MeshTool 进行网格划分，设置单元尺寸为 5。完成划分的面单元如图 4-28 所示。

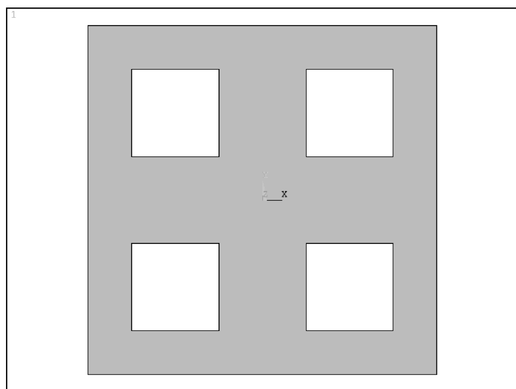


图 4-27　待拉伸平面几何模型

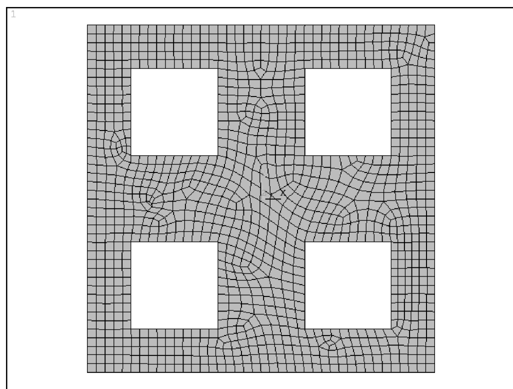


图 4-28　划分网格后的面

下一步添加体单元。在 GUI 界面中添加单元 SOLID186。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Elem Ext Opts 命令，弹出图 4-29 所示的 Element Extrusion Options 对话框。设置 TYPE Element type number 为 2 SOLID186，VAL1 NO. Elem divs 为 10，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Normal 命令，弹出 Extrude Area Along Normal 对话框。设置 DIST = 50，单击 OK 按钮。最终效果如图 4-30 所示。

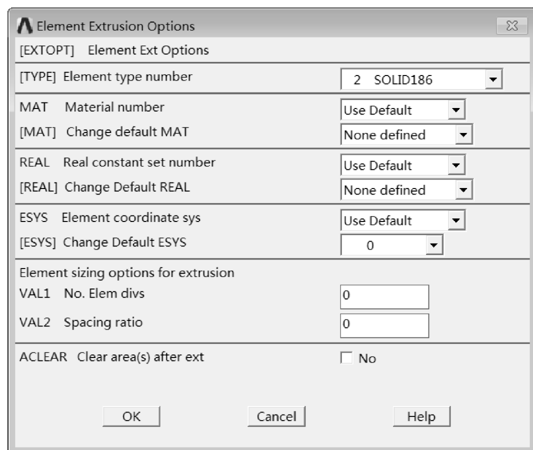


图 4-29　Element Extrusion Options 对话框

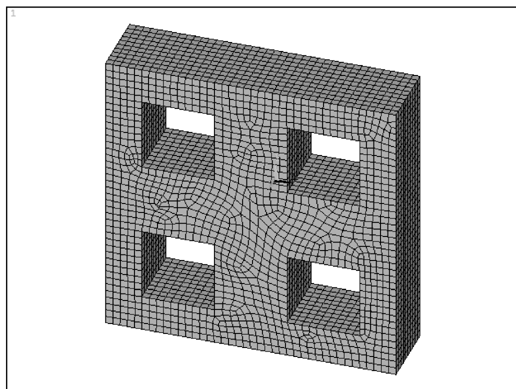


图 4-30　拉伸成体

4.4 映射网格划分 Mapped

映射网格划分 Mapped 只适用于“规则”的体和面，不适合复杂几何体。

映射网格的基本应用条件如下。

- 面有 3 条或 4 条边，体有 4、5、6 个面时可以应用。
- 面是奇数条边，每条边分割成偶数；体为 4 面时，三角形面上单元数必须为偶数。
- 面和体对边上必须划分相同的单元数。
- 面多于 4 条边、体多于 6 个面时，需要连接、合并、分割。

4.4.1 多边形面的映射网格划分

面映射网格划分的条件，除满足上述要求外，还应注意如下几点。

- 必须设置映射网格划分（MSHKEY，1）。根据 MSHAPE 的设置，划分结果全是四边形或全是三角形单元的映射网格。
- 如果生成三角形映射网格，还可用 MSHPATTERN 命令设置三角形网格的模式。
- 如果一个面多于 4 条边，则不能使用映射网格划分。不过，可以通过合并线和连接线使总线数减少到 4 条，从而实现映射网格划分。该方法多数情况下不如将复杂的面切分（ASBW 等命令）为边数不大于 4 条的多个面，那样更加方便和快捷。
- 使用连接线的替代方法是用 AMAP 命令，该命令直接拾取 3 个或 4 个角点进行面的映射网格划分，其实质是内部连接两关键点间的所有线。

这里以 2.2 节中用到的八边形为例，说明 Mapped 的方法。

如图 4-31 所示，此面有 8 条边，直接进行 Mapped 则会出现错误提示，如图 4-32 所示。

这时，我们需要将其中某些边连成一条，即减少边的数量，来满足 Mapped 的条件。由图 4-33 所示的编号可见，原图中有 8 条直线。

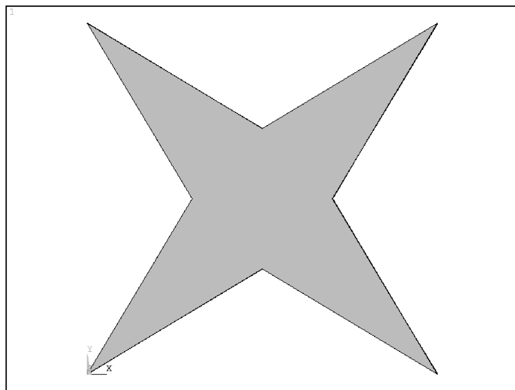


图 4-31 八边形

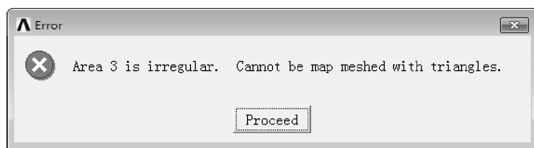
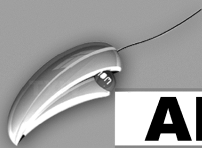


图 4-32 错误提示

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Lines 命令，弹出 Concatenate Lines 对话框。选择相邻两条直线进行合并，如图 4-34 所示。本例中每两条直线生成一条新的直线，生成的直线编号如图 4-35 中各角点处所示。此时，原本的 8 条直线未



变，只是相当于多了 4 条辅助直线，用于划分网格。

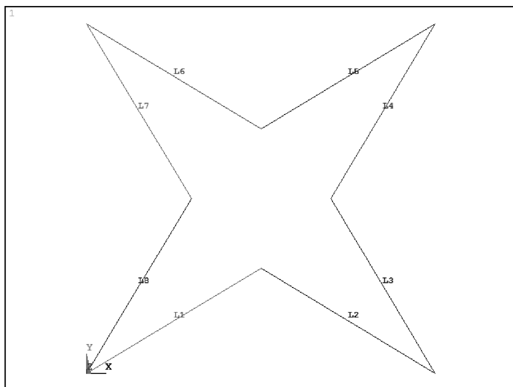


图 4-33　有 8 条线的平面

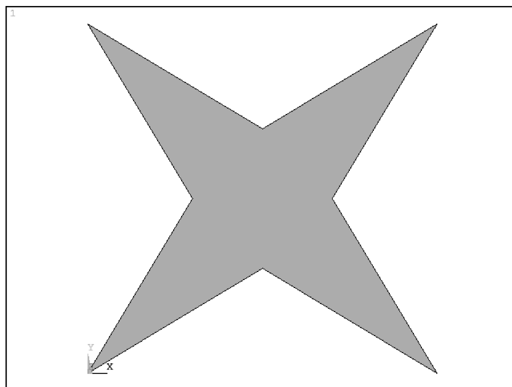


图 4-34　通过直线合并生成 4 条新的线

此时再进行 Mapped 即可，效果如图 4-36 所示。

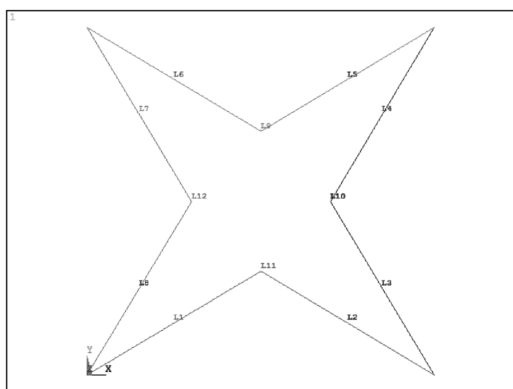


图 4-35　合并右和上两条直线

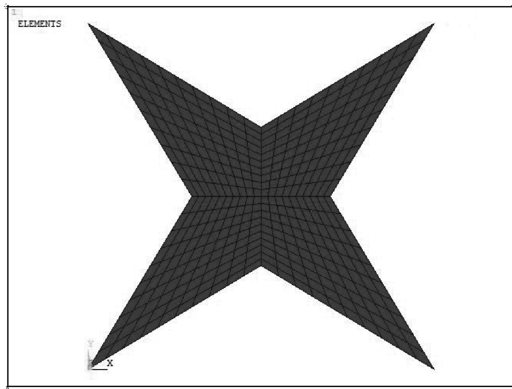


图 4-36　完成映射网格划分

划分完毕后，应删除之前连接形成的辅助直线（可通过 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > Del Concats > Lines 来完成）。

4.4.2 多面体的映射网格划分

对多面体进行映射网格划分，必须满足下列条件。

- 该多面体的外形为块状（6 个面）、楔形或棱柱（5 个面）、四面体（4 个面）。
- 多面体的对边必须划分相同数目的单元，或符合过渡网格要求的划分条件。
- 如多面体为棱柱或四面体，则三角形面上的单元数必须为偶数。

为了方便读者操作，在此依然以 2.2 节中的图形为例进行说明。单元类型设置为 SOLID65。

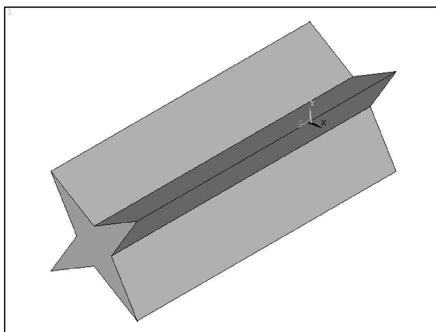


图 4-37　十面体

如图 4-37 所示十面体，由 8 个侧面、1 个顶面

和 1 个底面组成。根据要求，必须为四面体、五面体、六面体才可以进行体映射。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Areas 命令，弹出 Concatenate Areas 对话框。选择两个面，将其合并即可，如图 4-38 所示。依次合并相邻侧面，使其最终合成 4 个侧面，此时再进行 Mapped 即可。划分效果如图 4-39 所示。

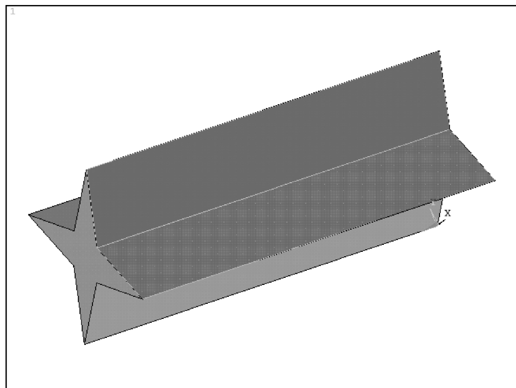


图 4-38 合并两面

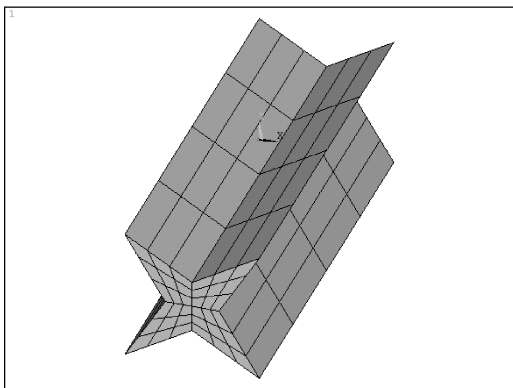


图 4-39 划分结果

4.5 扫掠网格划分 Sweep

除采用自由网格划分和映射网格划分外，对于 3D 几何体，还可采用扫掠（Sweep）网格划分。

4.5.1 体扫掠基本知识

对体进行扫掠网格划分，就是从源面（如边界面）网格扫掠整个体生成体单元。如果源面网格由四边形网格组成，则扫掠生成的均为六面体单元；如果源面网格由三角形网格组成，则扫掠生成的均为楔形体单元；如果源面网格由四边形和三角形网格组成，则扫掠生成六面体和楔形体单元。

对体进行扫掠网格划分，要求几何体具有一对拓扑结构相同的源面（Source Area）和目标面（Target Area）（源面与目标面允许形状不同，但可能导致扫掠失败），并且源面与目标面的对应顶点之间都用一条棱线相连，即是一个柱体或旋转体几何模型。

体的扫掠网格划分算法是：首先给源面划分面网格（自动进行，不需要事先人为划分面网格），然后沿柱体或旋转体棱线扫掠贯穿整个柱体或旋转体，生成多层体网格（三棱柱体单元和六面体单元）。

4.5.2 体扫掠的操作步骤与使用条件

在对体进行扫掠网格划分前，必须确认体是否满足扫掠网格划分条件。

如果体的拓扑关系存在下述情况，则不能进行扫掠网格划分。

- 有内腔，即体内存在一个连续封闭的边界。
- 源面与目标面不是相对面，即 SRCA 和 TRGA 不是对应的面。

● 体内存在一不穿过源面和目标面的孔洞，如平行于此两面的孔洞。

对体进行扫掠网格划分的操作步骤如下。

（1）定义合适的 2D 和 3D 单元类型。

如果对源面进行网格划分，并拟扫掠成六面体单元，则必须定义 2D 和 3D 的单元类型，以便划分相应的单元；并且 2D 和 3D 的单元类型宜相互协调，如均为二次单元等。

（2）设置扫掠方向的单元数目或单元尺寸。

（3）定义源面和目标面。

为扫掠网格划分指定源面和目标面。如果不指定源面或目标面，ANSYS 将自动确定源面和目标面；如果自动确定失败，将停止扫掠网格划分。如果有多个体进行扫掠网格划分，多于一个源面或目标面的设置将被忽略。

（4）对源面、目标面或侧面进行网格划分。

扫掠前面的网格划分不同，当然影响到扫掠生成的单元网格。如果不进行任何面的网格划分，系统则自动对面进行网格划分，然后再进行扫掠网格划分。

● 如不对面划分网格，则 ANSYS 采用 MSHAPE 命令的设置对面进行网格划分。
● 如果用 KSCON 命令设置源面网格划分，则应对源面先划分网格。
● 如果有硬点存在，且没有划分面网格，则不能进行扫掠网格划分。
● 如果源面和目标面都划分了网格，则其必须是匹配的，否则不能进行扫掠网格划分。源面和目标面的网格不必是映射网格。

为了方便读者，此处仍以之前 2.3 节建立的简单模型见图 4-40 所示为例，简要介绍如何进行扫掠网格划分。

进入前处理器，指定单元类型为 SOLID186。

指定材料属性，EX = 2.07E11Pa，PRXY = 0.3，DENS = 7800。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > Sweep Opts 命令，弹出图 4-41 所示的 Sweep Options 对话框。勾选 Tet mesh in nonsweepable volumes 复选框，单击 OK 按钮。

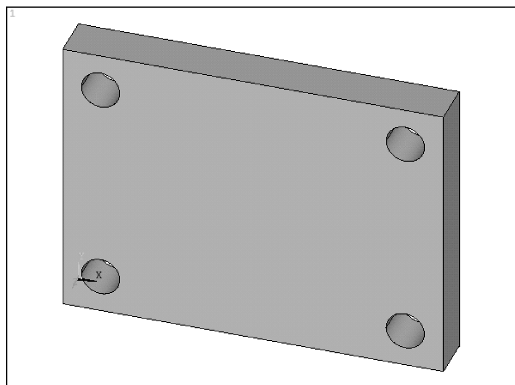


图 4-40　待划分模型

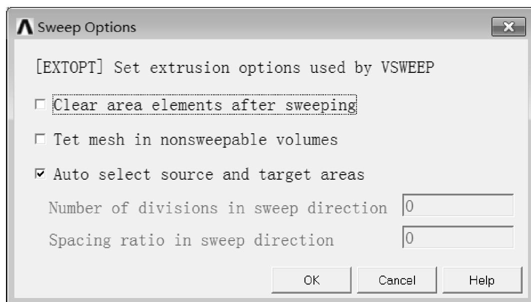


图 4-41　Sweep Options 对话框

打开 MeshTool 对话框，选择 Hex/Sweep 与 Sweep，在 Mesh 下拉列表框中选择 Pick Src/Trg，单击 Sweep 按钮，在弹出的拾取扫掠对象对话框中选择要扫掠的实体，如图 4-42 所示。

单击 OK 按钮，在工作区中拾取源面，如图 4-43 所示。

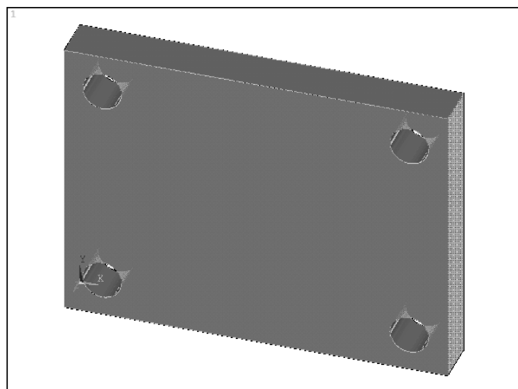


图 4-42　选择扫掠对象

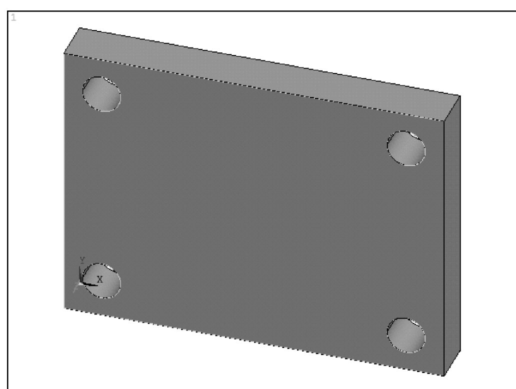


图 4-43　选择源面

单击 OK 按钮，拾取目标面，如图 4-44 所示。单击 OK 按钮，扫掠生成的网格如图 4-45 所示。

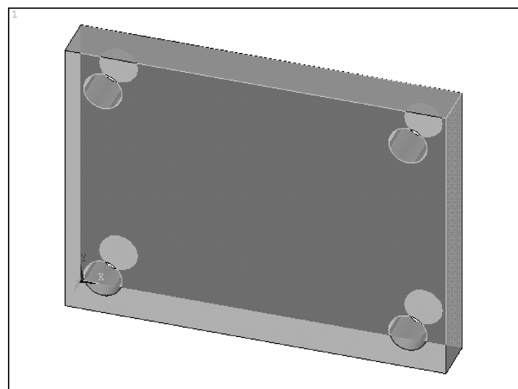


图 4-44　选择目标面

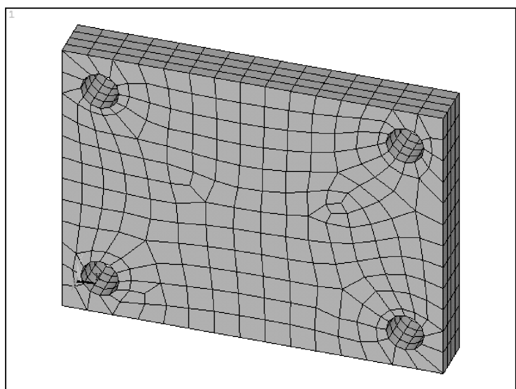


图 4-45　扫掠生成的有限元模型

技巧： 如果体扫掠网格划分因单元形状差而失败，可考虑如下对策。

- 如果没有指定源面和目标面，则指定之并重新执行扫掠划分。
- 交换源面和目标面，并重新执行扫掠划分。
- 另选一组完全不同的源面和目标面，并重新执行扫掠划分。
- 使用单元形状检查工具。
- 采用光滑处理，并重新执行扫掠划分。

4.6　本章小结

本章系统地讲解了 ANSYS 软件的网格划分功能。划分网格之前，有两大项工作需要完成，一个是单元类型及材料属性等的设置与赋值，一个是网格尺寸及划分形状、划分方法的确定。

单元类型的确定影响整个计算的正确性。在有限元数值求解中，单元的等效节点力、刚度矩阵、质量矩阵等均用数值积分生成，连续体单元以及壳、板、梁单元的面内均采用高斯（Gauss）积分，而壳、板、梁单元的厚度方向采用辛普森（Simpson）积分。辛普森积分点的间隔是一定的，沿厚度分成奇数积分点。由于不同单元的刚度矩阵不同，采用数值积分的求解方式不同，因此实际应用中一定要采用合理的单元来模拟求解。

有限元分析的精度和效率与单元的密度和几何形状有着密切的关系，应严格遵循相应的误差准则、设置适当的网格疏密程度，以避免网格的畸形。在网格重划分过程中，常采用曲率控制、单元尺寸与数量控制、穿透控制等控制准则。

映射划分和扫掠划分方法对模型几何形状有要求，因此，在建立模型时就要想好使用哪一种划分方法，选择合适的几何建模形状。



第 5 章　模型加载及求解分析

完成了网格的划分后，即获得了可用于计算的有限元模型。接下来的工作就是施加相应的荷载与约束，进行求解。合适的加载能够更好地模拟实际情况，正确反映实际结构的受力特征；而求解方式是否选择合适将直接影响到求解的精度和所花费的时间，甚至是否收敛。

本章将介绍荷载与加载方式的种类，以及施加约束及外荷载的方法，求解的控制方法，以及荷载步的设置，求解方法的操作等。

本章学习目标

- 了解 ANSYS 加载方式的种类
- 了解各种加载方式的特点及应用范围
- 掌握施加约束及荷载的方法
- 掌握求解过程的控制设置

5.1　加载的基础知识

在 ANSYS 中施加荷载有两种方式，即单步加载与多步加载。所谓单步加载就是把所有的荷载一次加齐后求解，是与时间无关的荷载；多步加载即荷载被分配在不同的荷载步中进行加载，可以分析时变的工况。

5.1.1 荷载的种类

按照物理特性的不同，ANSYS 中的荷载分为如下 6 类。

- 位移约束（DOF Constraint。其中 DOF 是指 Degrees of Freedom，即自由度）：将某个自由度用一已知值固定。在结构分析中约束被指定为位移边界或对称边界，在热分析中可以是温度和热通量平行的边界条件，在电磁分析中可以是磁势等。
- 集中荷载（Concentrated Loads）：指施加在模型节点上的荷载。在结构分析中可以在关键点或节点上指定力、力矩、位移，在热分析中可以是热导率，在电磁分析中可以是磁流段等。
- 表面荷载（Surface Loads）：施加于某个表面上的均布或按照一定的规则分布的荷载。在结构分析中可以是压力、位移，在热分析中可以是热对流，在电磁分析中可以是 Magnetic Maxwell Surfaces 等。
- 体积荷载（Body Load）：作用在体积或场域内的荷载。在热分析中可以是体积膨胀、

内生成热，在电磁分析中可以是磁流密度等。

- 惯性荷载（Inertia Loads）：由物体的惯性引起的惯性力，ANSYS 中的重力即以此方式设置。
- 耦合场荷载（Coupled - field Loads）：将一种分析结果作为另一种分析的荷载。例如，热分析得到的热应变可以作为结构分析的荷载。

若按照不同的学科，ANSYS 可以加载的荷载主要分为如下 5 类。

- 力场：位移、速度、加速度、力、热应变、重力。
- 热场：温度、热流率、对流、内部生成热、无限大表面。
- 磁场：磁势、磁通量、磁流段、电流源密度。
- 电场：电压、电流、电荷、电荷密度、无限大表面。
- 流场：速度、压力。

5.1.2 加载术语

ANSYS 的加载过程会涉及几个概念：荷载步（Load Steps）、荷载子步（Substeps）、斜坡荷载（Ramped Loads）、阶跃荷载（Stepped Loads）、时间（Time）、时间步（Time Step）、平衡迭代（Equilibrium Iterations）。以下对这些概念进行简要介绍，在今后的叙述中将会经常遇到这些概念。这些概念是分析求解的基本组成部分，读者应注意在实践中加深理解，不要拘泥于死记术语。

1. 荷载步、荷载子步、平衡迭代

荷载步是为求解而定义的荷载配置，可根据荷载的历程（时间与空间上）在不同的荷载步内施加不同的荷载。在时间上，ANSYS 支持斜坡荷载与阶跃荷载并以不同的荷载步表示。

荷载子步是某个荷载步内的求解点（由程序定义荷载增量），不同分析中荷载子步有着不同的目的。例如，在瞬态分析中使用子步可以得到较小的积分步长，以满足瞬态时间积累法则。

平衡迭代是在给定子步内为了收敛而进行的附加计算。在非线性分析中，平衡迭代作为一种迭代修正，具有重要的作用，迭代计算多次收敛后得到该荷载子步的解。

2. 斜坡荷载、阶跃荷载

当一个荷载步中设置一个以上子步时，就必须定义荷载是斜坡荷载或阶跃荷载，如图 5-1 所示。

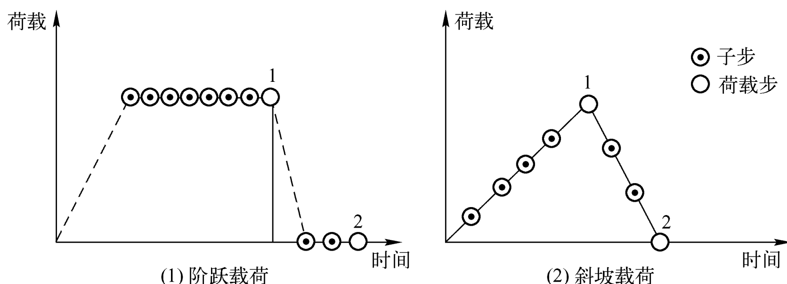


图 5-1 阶跃荷载与斜坡荷载

斜坡荷载是指在每个荷载子步内，荷载逐渐增加，在该荷载步结束时达到全值。

阶跃荷载是指将荷载全值施加在第 1 个子步，其余子步内保持不变。

3. 时间、时间步

在所有静态与稳态分析中，不管与时间是否真实相关，ANSYS 都使用时间作为跟踪参数。在所有的情况下，时间可以作为一个计数器，总是单调递增的。

瞬态分析或与速度（速率）有关的静态分析中，时间代表了通常意义上的时间，可以小时、分、秒来表示，在指定荷载历程时在每个荷载步终点给时间赋值。

在与速度（速率）无关的静态分析中，时间仅仅成为荷载步与子步的计数器，每一个荷载步与子步都与一个时间点对应，故子步也称为时间步。此时的时间可以为任意单位，程序会在默认情况下给时间自动赋值。

当采用弧长求解法时，时间等于荷载步开始的时间值加上弧长荷载系数的数值，此时的时间可以不单调递增。

荷载步和子步都与时间点对应，平衡迭代就是为了收敛在给定的时间点上进行迭代求解的方法。

5.1.3 加载类型及特点

1. 加载类型

在 ANSYS 程序中，总体上有两种加载，用户既可以把荷载施加在实体模型（关键点、线、面、体等）上，也可以施加在有限元模型（节点、单元）上。

提示：如果荷载施加在几何模型上，ANSYS 在求解前先将荷载转化到有限元模型上。

（1）施加在实体模型上。

优点：

- 模型荷载独立于有限元网格之外，这样就不必因为网格重新划分而重新加载。
- 通过图形拾取来加载时，因为实体较少，所以施加荷载简易。

缺点：

- 不能显示所有的实体模型荷载。
- 施加关键点约束的扩展时，在两个关键点施加的约束会扩展到关键点之间的直线上所有的节点上，有时这种约束并不是实际的约束情况，因此在使用扩展约束时，在关键点上施加约束要特别小心。

（2）施加在有限元模型上。

优点：

- 约束可以直接施加在节点上，所以扩展约束没有影响。
- 荷载可以直接施加在节点上。

缺点：

- 任何对有限元网格的修改都会使已施加的荷载无效，需要删除先前的荷载并在新网格上重新施加荷载。
- 不方便处理线荷载和面荷载，因为原来施加在一条线上的荷载需要逐个节点来拾取，原来施加在一个面上的荷载需要逐个单元来拾取，非常麻烦。

2. 加载步骤

(1) 选择荷载形式，如 Displacement（位移）、Force/Moment（力/力矩）、Pressure（压力）、Temperature（温度）等。

(2) 选择加载的对象，如 On Keypoints、On Lines、On Areas、On Nodes、On Element 等。

(3) 指定荷载的方向和数值。

5.2 施加约束

不同的学科可被约束的自由度不同，总结各学科的自由度列于表 5-1 中，便于读者参考。

表 5-1　各学科中可约束自由度

学　　科	自由度名称	标　识　符
结构分析	平动/转动	UX,UY,UZ/ROTX,ROTY,ROTZ
热分析	温度	TEMP
磁场分析	矢量势/标量势	AX,AY,AZ/MAG
电场分析	电压	VOLT
流体分析	速度/压力/紊流动能/紊流扩散速率	VX,VY,VZ/PRES/ENKE/ENDS

位移约束可以施加于节点、关键点、线、面上，删除与施加的命令整理见表 5-2，方便读者查阅。具体命令的使用方法将在 APDL 程序化语言中进行专题讲解。

表 5-2　约束自由度的命令

施 加 位 置	基 本 命 令	附 加 命 令
节点	D、DDELE、DLIST	DSYM、DSCALE、DCUM
关键点	DK、DKDELE、DKLIST	
线	DL、DLDELE、DLLIST	
面	DA、DADELE、DADLIST	
转换	SBCTRAN	DTRAN

下面以在结构分析中施加位移约束为例，讲解如何施加位移约束。

在结构分析中，位移约束中相应的自由度包括平动和转动，共有 6 个，即 UX、UY、UZ（X、Y、Z 方向平动自由度）及 RTOX、RTOY、RTOZ（X、Y、Z 方向的转动自由度）。它们可以施加在线、面、关键点、节点上。位移方向与总体坐标轴正向相同时取正值，否则取负值。

施加位移约束的路径：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement，如图 5-2 所示。

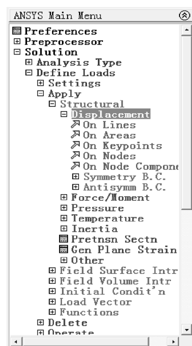


图 5-2　施加位移约束路径

5.2.1 在关键点（或节点）上加载位移约束

在关键点上施加位移约束：在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Ap-

ply > Structural > Displacement > On Keypoints 命令。

在节点上施加位移约束：在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令。

以在节点上施加位移约束为例，通过上述路径选择要约束的节点，单击 OK 按钮，弹出 Apply U，ROT on KPs 对话框，如图 5-3 所示。

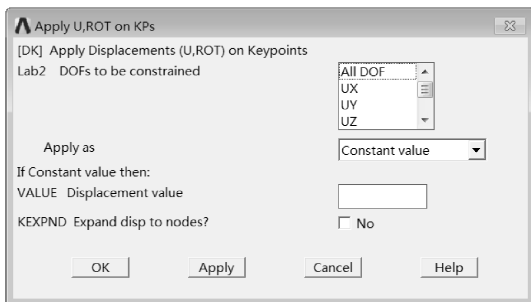


图 5-3 Apply U,ROT on KPs 对话框

在右侧第 1 个下拉列表框中选择要约束的自由度，其中 All DOF 为约束所有 6 个自由度，UX、UY、UZ 为 3 个方向的平动自由度，而 ROTX、ROTY、ROTZ 为 3 个转动自由度。在 VALUE Displacement value 框中可以输入自由度的值，默认为 0。

技巧：通过输入非零的实数，可以对指定节点施加位移约束，这在后面的实例问题分析中会用到。

提示：在关键点上施加位移约束与在节点上施加位移约束类似。

5.2.2 在线（或面）上加载位移约束

在线（或面）上施加位移约束的方法：在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines（或 On Areas）命令。

与节点（或关键点）约束不同的是，对线和面约束的自由度最多只有 3 个，即 3 个平动自由度，如图 5-4 所示。其他步骤相同，不再赘述。

5.2.3 对称约束与反对称约束

在位移约束中还有两个非常重要的约束，就是施加在对称面上的对称约束和反对称约束。

（1）对称约束：限制对称面内所有节点的两个方向转动自由度，同时限制了垂直于对称面的平动自由度。

路径：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > Symmetry B. C. > On Areas。

（2）反对称约束：限制对称面内所有节点的两个方向平动自由度，同时限制了垂直于对称面的转动自由度。

路径：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > Antisymm B. C. > On Areas。

图 5-5 所示为对称约束与反对称约束示意图。

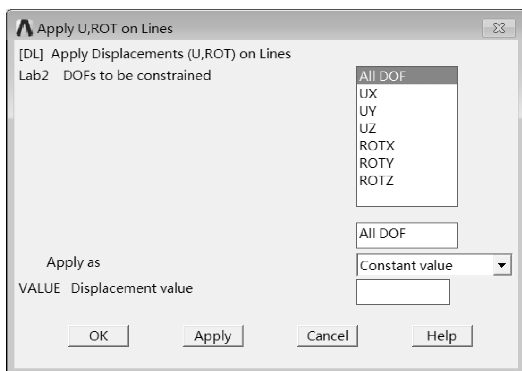


图 5-4 对线施加自由度约束

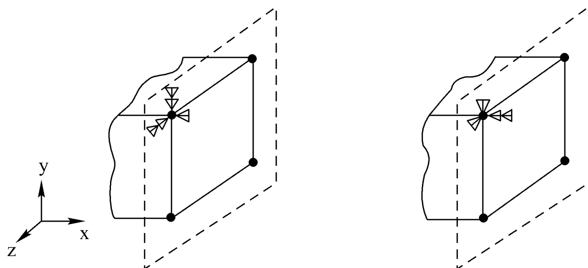


图 5-5 对称约束与反对称约束示意图

如图 5-6 所示为可应用对称和反对称约束的典型问题示例。

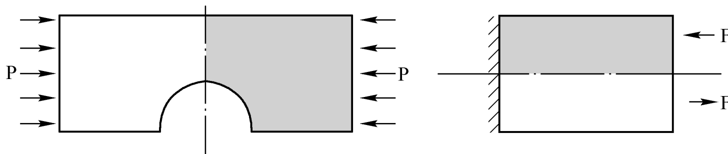


图 5-6 对称约束与反对称约束应用示例

技巧：在对称模型的简化分析中，经常采用 1/4、1/2 模型，这时在对称面上应用对称约束或反对称约束是非常方便的。

5.2.4 耦合

正如位移约束能约束模型中确定的节点一样，耦合与约束方程可以建立节点间的位移关系。

耦合是指使一组节点具有相同的自由度，一般具有如下特点。

- 每次耦合设置只能针对一个自由度标识，如 UX、TEMP 等。
- 可同时对任意节点数进行耦合。
- 耦合设置中任意实际的自由度方向在不同的节点上可能是不同的。
- 耦合设置只将主自由度保留在分析矩阵中，而其他从自由度将被删除。
- 对进行过耦合自由度设置的节点进行加载时，荷载将作用在主自由度上。

典型的耦合自由度应用有下列 3 种。

- 模型对称性时用于施加对称性条件。由于结构的对称性，某些平面分析过程中始终保持在一个平面内，即可进行耦合。
- 在两个重合节点间形成销、铰链、万向节、滑块连接等。如为了模拟铰链，将同一位置的两个不同节点的平动自由度耦合起来，而不耦合转动自由度，即形成铰链。
- 模拟无摩擦的界面。如果两个界面上节点一一对应，两表面保持接触，可忽略摩擦且分析是几何线性的，则可通过仅耦合垂直于界面的自由度来模拟接触。使用耦合自由度模拟无摩擦的界面有以下优点：分析仍然是线性的、无间隙收敛性问题。

在选取的节点处生成耦合自由度集：在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Coupling/Ceqn > Couple DOFs 命令，选择要耦合的节点，然后单击 OK 按钮，弹出图 5-7 所示的 Define Coupled DOFs 对话框，然后根据需要依次进行设置即可。也可以采用 CP 命令来进行操作，详细方法参见第 7 章。



图 5-7　Define Coupled DOFs 对话框

修改已有的耦合自由度集：在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Coupling/Ceqn > Coincident Nodes 命令，弹出图 5-8 所示的 Couple Coincident Nodes 对话框，在其中输入要设定的容差值，然后单击 OK 按钮即可。

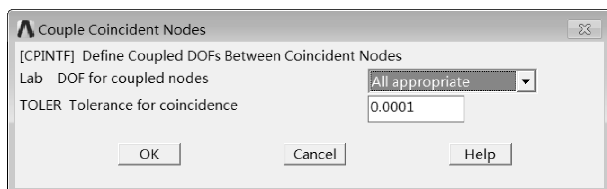


图 5-8　Couple Coincident Nodes 对话框

一旦有了一个或多个耦合自由度集，即可使用节点号相同但自由度标识符不同的耦合自由度集。方法如下：在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Coupling/Ceqn > Gen w/Same Nodes 命令，弹出图 5-9 所示的 Generate Coupled DOF Sets w/Same Nodes 对话框，根据提示完成操作即可。

相应的，也可以从已有的耦合自由度集生成新的耦合自由度集，新生成的耦合自由度集与已有的耦合自由度集具有相同的自由度标识符但不同的节点号。方法如下：在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Coupling/Ceqn > Gen w/Same DOF 命令，弹出图 5-10 所示的 Generate Coupled DOF Sets w/Same DOF 对话框，根据提示完成操作即可。

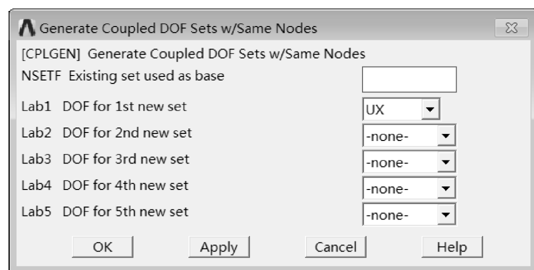


图 5-9　Generate Coupled DOF Sets w/Same Nodes 对话框

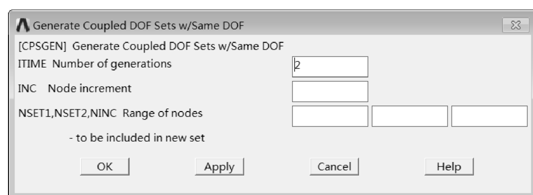
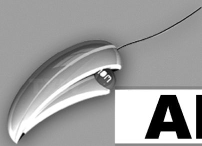


图 5-10　Generate Coupled DOF Sets w/Same DOF 对话框



5.2.5 约束方程

约束方程定义了节点自由度之间的线性关系。它提供了比耦合更通用的数学形式：

$$\text{Constant} = \sum_{i=1}^{n} (\text{Coefficient}(i) \times U(i))$$

式中，$U(i)$是自由度；n是方程中项的编号。

约束方程可以将任意节点的任意自由度进行组合，且任意实际的自由度方向在不同的节点上可能不同。建立约束方程的常见思路有：

- 直接定义约束方程。
- 生成刚性区域。
- 连接疏密不同的已划分网格。

1. 直接定义约束方程

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Coupling/Ceqn > Constraint Eqn 命令，在弹出的图 5-11 所示 Define a Constraint Equation 对话框中根据提示进行操作，即可直接定义约束方程。

例如，在图 5-12 所示的示例中，力矩传递由 BEAM 单元与 PLANE 单元的连接完成，两者约束方程可定义如下。

$$ROTZ_2 = (UY_3 - UY_1)/10$$
$$0 = UY_3 - UY_1 - 10 * ROTZ_2$$

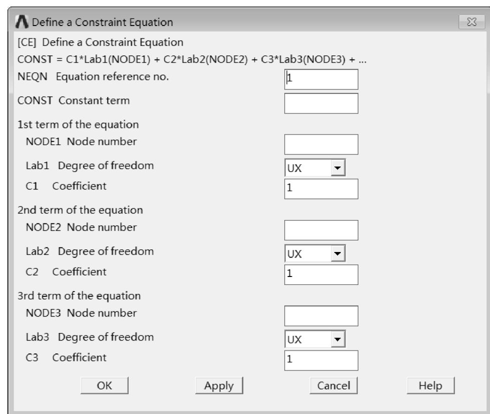


图 5-11 Define a Constraint Equation 对话框

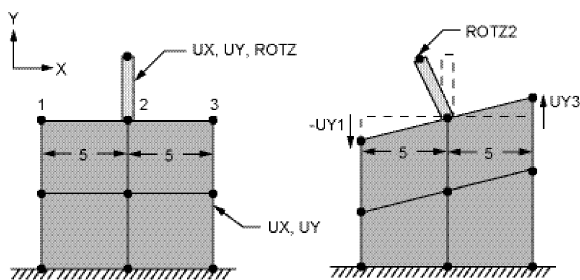


图 5-12 连接不同的单元类型

2. 生成刚性区域

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Coupling/Ceqn > Rigid Region 命令，选择主节点与从节点，在弹出的图 5-13 所示 Constraint Equation for Rigid Region 对话框中根据提示进行操作。

3. 连接疏密不同的已划分网格

在接触面，可将一个网格较疏区域的已选节点与一个网格较密区域的已选单元连接起来生成约束方程。方法如下：在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Coupling/Ceqn >

Adjacent Regions 命令，在弹出的图 5-14 所示 Constraint Equations Connecting Adjacent Regions 对话框中根据提示操作即可。

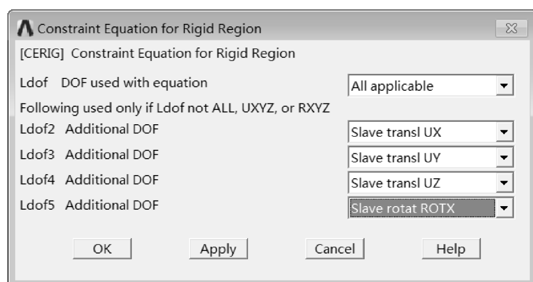


图 5-13 Constraint Equation for Rigid Region 对话框

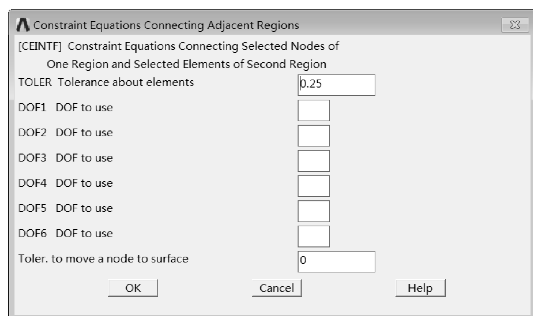


图 5-14 Constraint Equations Connecting Adjacent Regions 对话框

在 ANSYS 中可以设置耦合约束来模拟铰链、无摩擦滑动器、万向节、无摩擦接触面等问题。一个耦合约束是设置一组被约束在一起，有着相同大小但数值未知的自由度。

路径：Main Menu > Preprocessor > Coupling/Ceqn > Couple DOFs。

对于需要在同一位置的所有节点之间自动生成耦合关系的情况，可通过以下路径实现。

路径：Main Menu > Preprocessor > Coupling/Ceqn > Coincident Nodes。

5.3 施加荷载

荷载的施加分为实体模型加载与有限元模型加载两种。用户应根据分析对象的特点合理选择，尽量保证加载过程简洁清晰，以利于后续分析。

5.3.1 集中荷载

不同学科中可用的集中荷载都有各自的标识符，整理归类于表 5-3 中，方便读者查阅。

表 5-3 不同学科中的集中荷载

学 科	荷载名称	标 识 符
结构分析	力/力矩	FX,FY,FZ/MX,MY,MZ
热分析	热流速率	HEAT
磁场分析	Current Segments/磁通量/电荷	CSGX,CSGY,CSGZ/FLUX/CHRG
电场分析	电流/电荷	AMPS/CHRG
流体分析	流体流动速率	FLOW

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Define Loads > Apply > Load Type > On Objects 命令、Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Load Type > On Objects 命令，均可以施加集中荷载。上述的 Load Type 可以选择结构分析、热分析等，On Objects 可以选择要施加荷载的对象为节点、关键点等。

5.3.2 表面荷载

不同学科中可用的表面荷载都有各自的标识符，整理归类于表 5-4 中，方便读者查阅。

表 5-4　不同学科中的分布荷载

学　科	分布荷载名称	标　识　符
结构分析	压力	PRES
热分析	对流/热流量/无限表面	CONV/HFLUX/INF
磁场分析	麦克斯韦表面/无限表面	MXWF/INF
电场分析	麦克斯韦表面/表面电荷密度/无限表面	MXWF/CHRGS/INF
流体分析	流体结构界面/阻抗	FSI/IMPD
所有学科	超级单元荷载矢	SELV

ANSYS 按适当方式将压力施加于轴对称梁单元或壳单元的内外表面。对于分层壳单元，面内压力荷载矢量施加在节点平面上。KEYOPT（11）决定壳内节点平面的位置。当用平面单元代表二重曲面时，子午半径函数的值是不精确的。

以结构分析为例，表面荷载就是施加的压力。当表面荷载方向指向物体内部时取正值，否则取负值。ANSYS 不仅可以将表面荷载施加在线上、面上，还可以将表面荷载施加在节点、单元以及梁上。

表面荷载总体上分为均布荷载和非均布荷载，如图 5-15 所示。

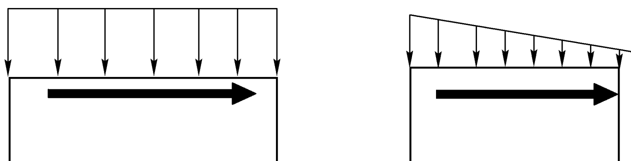


图 5-15　表面荷载

1. 在线、面上施加表面荷载

下面以在面上施加表面荷载为例进行说明。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Areas 命令，拾取要添加压力的面，弹出 Apply PRES on areas 对话框，如图 5-16 所示。在［SFA］Apply PRES on areas as a 下拉列表框中有 3 个选项，分别介绍如下。

- Constant：均布荷载。若选择此项，则在接下来的 VALUE Load PRES value 框中输入均布荷载的值即可。
- New table：建立新的荷载表。用户可以通过定义荷载表（数组荷载），施加非均布的荷载。选择此项，单击 OK 按钮，弹出图 5-17 所示 Apply PRES on areas 对话框。在 Name of new table 框中输入新的荷载表名，单击 OK 按钮，在弹出的图 5-18 所示对话框中，定义荷载表的行、列变量属性。对应的数组可以从已有文件中读取（Read from file），也可以在图形窗口中进行定义，如图 5-19 所示。

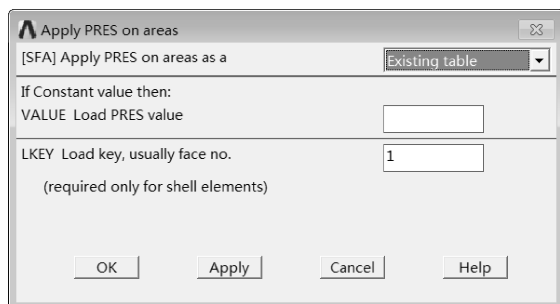


图 5-16 Apply PRES on areas 对话框

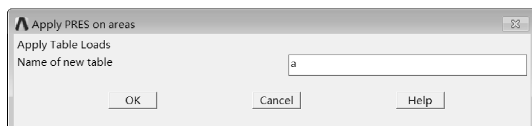


图 5-17 设置新的荷载表

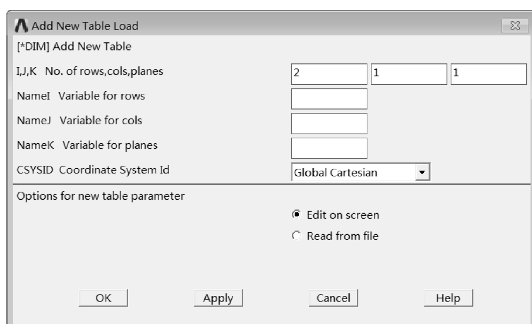


图 5-18 添加数组荷载

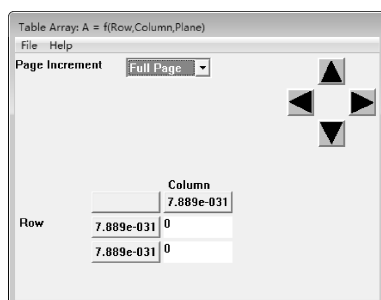


图 5-19 定义数组荷载

● Existing table：选择此项，则可以直接调用已定义好的荷载表。

注意：

ANSYS 中的线是有方向的，相当于从起始关键点到终止关键点的一条矢量线，这在很多分析中非常重要。观察方向通过 Utility > PlotCtrls > Symbol 设置 Line direction ☑ on 即可。

对于非线性的函数分布荷载，可以通过分段近似线性加载的方法，或者通过不同节点处加载不同集中力的方法进行模拟（使用数组荷载定义）

2. 在单元上施加表面荷载

ANSYS 中可以在单元上直接施加表面荷载，如图 5-20 所示。

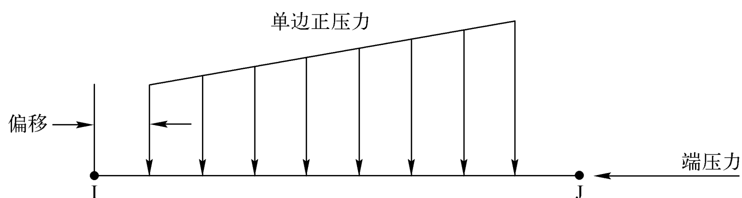


图 5-20 梁单元表面荷载示例

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Elements 命令，拾取实施加荷载的单元，单击 OK 按钮，弹出 Apply PRES on elems 对话框，如图 5-21 所示。

如果单元上的荷载是均布的，只需在 VALUE Load PRES value 框中输入荷载值即可；如果不是均布荷载，则需要输入其他节点上的荷载值。各节点之间的荷载分布规律，按线性变

化处理，如图 5-21 所示。

有时可能需要施加一个所用单元不能接受的表面荷载。例如，在结构实体单元上施加均布切向（或任何非法向）压力，在热分析实体单元上施加辐射指定等。在这些情况下，可以使用表面效应单元覆盖要施加荷载的表面，并利用这些单元作为“管道”施加所需的荷载。

可供选用的表面效应单元：平面模型可用 SURF151、SURF153、SURF152，三维实体模型可用 SURF154、SURF156、SURF159。

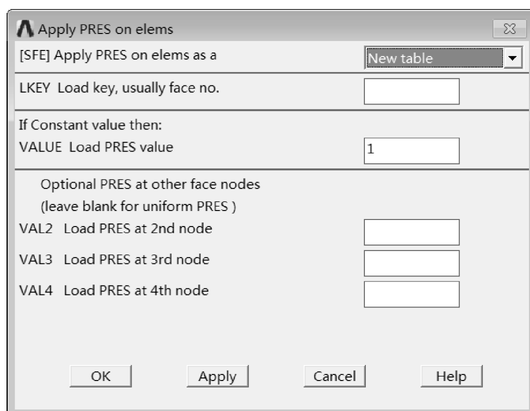


图 5-21　Apply PRES on elems 对话框

5.3.3 体积荷载

各学科可以施加的体积荷载见表 5-5。

表 5-5　不同学科中的体积荷载

学　　科	体积荷载名称	标　识　符
结构分析	温度	TEMP
	频率	FREQ2
	能量密度	FLUE
热分析	热产生率	HGEN
磁场分析	温度	TEMP
	电流密度	JS
	虚位移	MVDI
	压降	VLTG
电场分析	温度	TEMP
	体积电荷密度	CHRGD
流体分析	热产生率	HGEN
	受力密度	FORC

对模型施加体积荷载有以下几种方法。

- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > load type > On Nodes 命令。
- 在 GUI 界面中选择 Utility > List > Loads > Body > On Picked Elems 命令。
- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > load type > On Keypoints 命令。
- 在 GUI 界面中选择 Utility > List > Loads > Body > On Picked Lines 命令。
- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > load type > On Volumes 命令。

1. 对单元施加体荷载

在 ANSYS 中，可以利用 BFE 命令逐个对单元施加体积荷载。然而，对应需要施加多个荷载值的单元，可以在一个单元的多个位置指定体积荷载。所使用的位置随单元类型的不同而异，默认位置也随单元类型的不同而异。

对于平面实体单元（PLANE）与空间实体单元（SOLID），体积荷载的施加位置通常位于单元的角点，如图 5-22 所示。

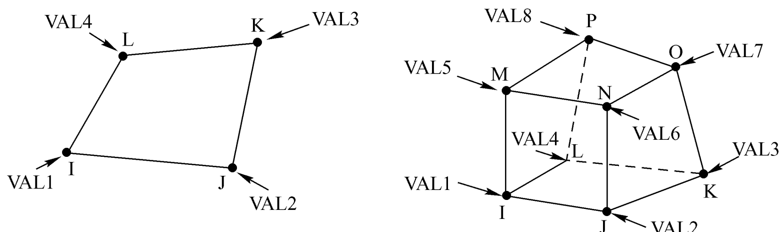


图 5-22 PLANE 单元与 SOLID 单元的体积荷载施加位置

对于壳（SHELL）单元，体积荷载的施加位置通常位于顶面与底面的“伪节点”上，如图 5-23 所示。

对于一维单元（BEAM、LINK、PIPE 等），与 SHELL 单元类似，加载的位置通常位于所谓“伪节点”，如图 5-24 所示。

在所有情况下，如包含退化单元，必须在所有位置指定单元荷载，包括在重合节点（退化节点）处施加重复荷载值。另一种简单可用的方法是使用 BF 命令直接在节点处指定体积荷载值。

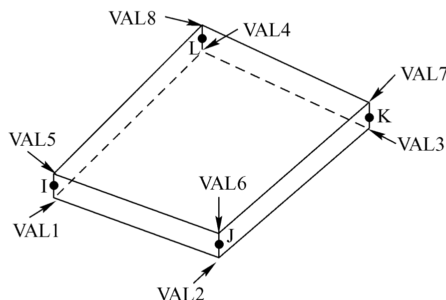


图 5-23 SHELL 单元的体荷载施加位置

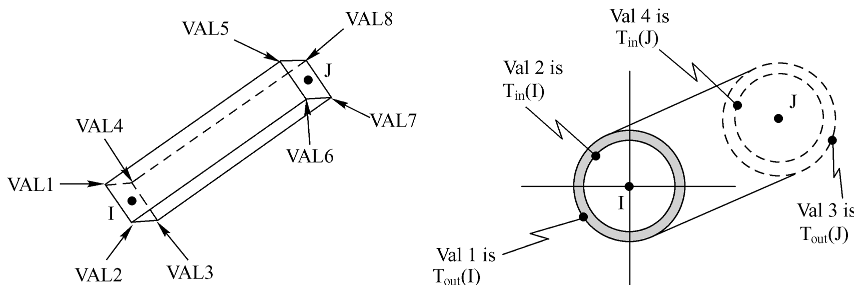


图 5-24 一维单元的体积荷载施加位置

2. 对关键点施加体积荷载

BFK 命令用于对关键点施加体荷载。如果在面或体的角部关键点处施加体积荷载，对于待转换到面或体的内部节点的荷载，所有的荷载值必须相等。如果指定了不相等的荷载值，这些荷载将仅仅被转换到与关键点连线的节点上，如图 5-25 所示。

3. 对线、面、体施加体积荷载

BFL、BFA、BFV 命令分别用于对模型中被选中的线、面、体施加体积荷载。需要注意的是，施加在线上的体积荷载会被转换到对应的有限元模型的节点上，施加在面、体上的体积荷载将会被施加到对应的有限元模型的单元上。

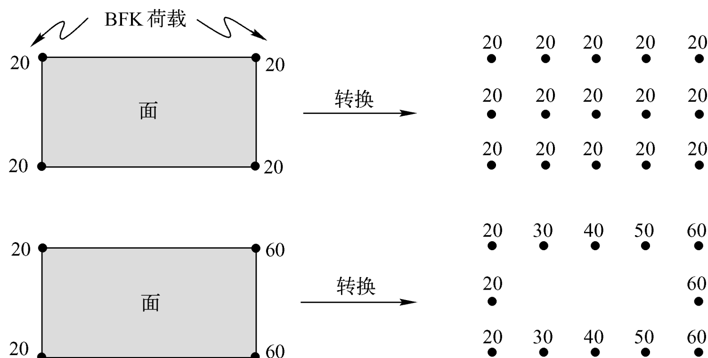


图 5-25 对关键点施加体积荷载

4. 定义均布体积荷载

定义均布荷载可以在对模型所有的节点都产生作用，常用于形成均布温度场。即结构分析中的均布温度场、瞬态分析或非线性分析中的均布起始温度，均可以由此生成。可以有如下方法用于形成均布体荷载。

- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural or Thermal > Temperature > Uniform Temp 命令。
- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Settings > Uniform Temp 命令。
- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural or Thermal > Temperature > Uniform Temp 命令。
- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Settings > Uniform Temp 命令。
- 在命令输入框中输入并运行 BFUNIF 命令。

5.3.4 惯性荷载

惯性荷载仅当模型具有质量时有效。惯性荷载通常是通过指定密度参数施加的，也可以使用质量单元（如 MASS21）对模型施加质量，但通过密度的方式更为常用，也更为有效。对其他数据，ANSYS 要求质量为恒定单位。只有在下列情况下，重量密度可以用于替代质量密度。

- 模型仅用于静态分析。
- 未施加角速度、角加速度。
- 重力加速度为单位值。

在直角坐标系中，ACEL、OMEGA、DOMEGA 命令分别用于指定加速度、角速度、角加速度。

5.3.5 耦合场荷载

在耦合场分析中，经常要将一个物理场分析的结果用于另一个物理场分析的加载。例如，将热分析的结果作为温度荷载加载于结构分析过程中。施加耦合场荷载有如下方法。

- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > load type > From source 命令。
- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > load type > From source 命令。

- 在命令输入框中输入并运行 LDREAD 命令。

5.3.6 轴对称荷载与反作用力

对约束、表面荷载、体积荷载和 Y 方向加速度，可以像在任何非轴对称模型上定义这些荷载一样，在轴对称模型上精确地定义这些荷载。然而对集中荷载的定义，则略有不同。因为这些荷载的大小、输入的力、力矩等数值都是在 360°的范围内，例如图 5-26 所示，轴对称荷载被施加到一个圆管上。

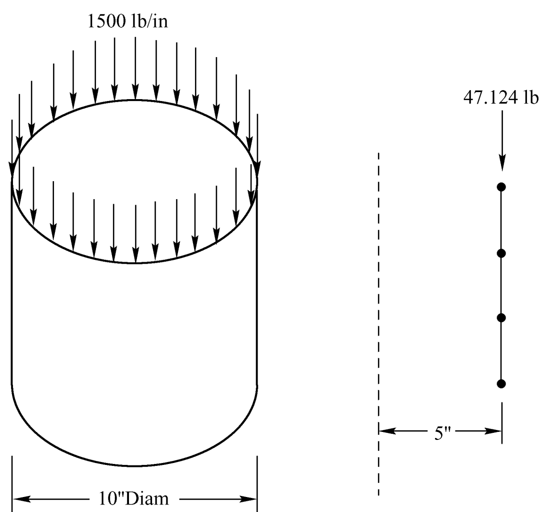


图 5-26 轴对称荷载示例

示例中的荷载按下列方式被加载到模型上，F,N,FY,47124。轴对称结果也按对应的输入荷载相同的方式解释，即输出的反作用力、力矩等按总荷载计算。

轴对称协调单元要求其荷载以程序能作为傅里叶级数来说明的形式施加，对于这些单元，应采用如下方法。

- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Other > For HarmonicEle 命令。
- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > For HarmonicEle 命令。

需要注意的是，要指定足够数量的约束以防止产生非预期的刚体运动、不连续或奇异性。例如，对实心杆这样的实体结构的轴对称模型，缺少沿对称轴的 UX 约束，在结构分析中就隐含了允许形成虚 VOIDS，如图 5-27 所示。

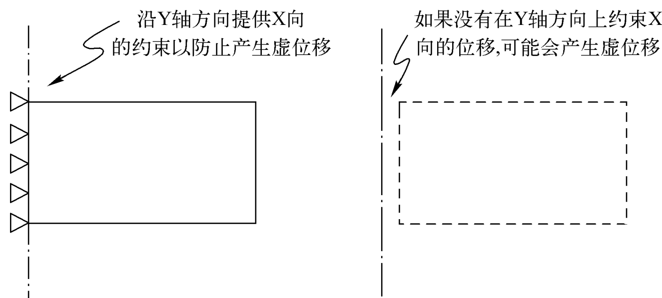


图 5-27 轴对称结构的中心约束

如果施加的荷载作用于对荷载不产生任何抵抗的 DOF 上，即荷载作用在完全零刚度的对象上，ANSYS 将会直接将该荷载忽略。

5.3.7 初应力荷载

在 ANSYS 中进行结构分析时，初始应力可以作为一项荷载——只在静态分析与瞬态分析中被承认（线性或非线性分析均可）。初始应力荷载只能在分析的第 1 荷载步中施加，恒应力可以用 ISTRESS 命令定义。使用 ISFILE 命令从输入文件中获取初始应力值。为了列表或是删除初始应力，命令变元允许初始应力被限制为具体的材料类型。

要在分层的 SHELL181 单元中某一指定层上施加初始应力，可以使用指定层的材料 ID 号。在初始应力命令中使用 MAT 字段可以根据层的材料 ID 号施加需要的应力，也可以在 SHELL181 单元的所有层上施加初始应力，然后删除那些不希望有初始应力的层上的初始应力。使用“DELETE，elementID”层号命令，还可以用初始应力命令列表或删除分层 SHELL181 单元中指定层上的初始应力值。

初始应力功能只支持以下单元类型：PLANE2、PLANE42、SOLID45、PLANE82、SOLID92、SOLID95、LINK180、SHELL181、PLANE182、PLANE183、SOLID185、SOLID186、SOLID187、BEAM188、BEAM189。

5.3.8 由表型数组定义荷载

使用表型数组定义荷载，可以通过分析的加载命令或菜单路径来实现。不需要为具体的荷载指定值，只需要指定表型数组的名称即可。并不是所有的边界条件都支持表型数组，支持的边界条件列于表 5-6 中，方便读者查阅。

表 5-6 支持表型数组的边界条件

边界条件	主变量	命令
热分析		
Fixed Temperature	TIME，X、Y、Z	D，，（TEMP，TBOT，TE2，TE3，. . . . ，TTOP）
Heat Flow	TIME，X、Y、Z，TEMP	F，，（HEAT，HBOT，HE2，HE3，. . . . ，HTOP）
Film Coefficient (Convection)	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY	SF，，CONV
		SFE，，，CONV
Bulk Temperature (Convection)	TIME，X、Y、Z	SF，，，TBULK
		SFE，，，TBULK
Heat Flux	TIME，X、Y、Z，TEMP	SF，，HFLU
		SFE，，，HFLUX
Heat Generation	TIME，X、Y、Z，TEMP	BFE，，HGEN
Uniform Heat Generation	TIME	BFUNIF，TEMP
结构分析		
Displacements	TIME or FREQ，X、Y、Z，TEMP	D，（UX，UY，UZ，ROTX，ROTY，ROTZ）
Hydrostatic Pressure	TIME or FREQ，X、Y、Z，TEMP	D，HDSP

（续）

边界条件	主变量	命令
Forces and Moments	TIME or FREQ，X、Y、Z，TEMP，SECTOR	F，（FX，FY，FZ，MX，MY，MZ）
Fluid Mass Flow Rate	TIME or FREQ，X、Y、Z，TEMP，SECTOR	F，DVOL
Pressures	TIME or FREQ，X、Y、Z，TEMP，SECTOR	SF,，PRES
		SFE,,，PRES
Temperature	TIME，X、Y、Z，TEMP	BF,，TEMP
		BFE,，TEMP
Linear Acceleration	TIME or FREQ，X、Y、Z	ACEL，ACEL_X，ACEL_Y，ACEL_Z
Translational Acceleration	TIME or FREQ，X、Y、Z	CMACEL，CMACEL_X，CMACEL_Y，CMACEL_Z
Super element Load Vector	TIME	SFE,,，SELV
磁场分析		
Current Density	TIME，X、Y、Z	BFE,，JS
电场分析		
Voltage	TIME，X、Y、Z	D,，VOLT
Current	TIME，X、Y、Z	F,，AMPS
高频电磁分析		
Current Density	TIME，X、Y、Z	BFE,，JS
流体分析		
Pressure	TIME，X、Y、Z	D,，PRES
Flow	TIME，X、Y、Z	F,，FLOW
扩散分析		
Concentration	TIME，X、Y、Z	D,，CONC
Diffusion Flow Rate	TIME，X、Y、Z	F,，RATE
FLOTRAN 分析		
Nodal DOF	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	D,，（VX，VY，VZ，PRES，TEMP，ENKE，ENDS，SP01 – SP06）
Nodal DOF for ALE formulation	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRES，Xr，Yr，Zr	D,，（UX，UY，UZ）
Heat Flux	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	SF,，HFLUX
		SFE,,，HFLUX
Film Coefficient	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	SF,，CONV
		SFE,,，CONV
Element Heat Generation	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	BFE,，HGEN
Nodal Heat Generation	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	BF,，HGEN
Nodal Body Force	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	BF,，FORCE

（续）

边界条件	主变量	命令
Radiation	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	SF，，RAD
		SFE，，，RAD
Fluid Volume	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	SF，，VFRC
		SFE，，，VFRC

关于命令的具体用法，在后文学习 APDL 语言后，将为读者进行详细介绍。

定义荷载时，可以选择 NEW TABLE 定义一个新表格。可以通过在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit 命令来实现。

5.3.9 荷载显示与控制

1. 在图形中显示荷载

通常情况下，施加在几何实体模型上的荷载，用相应的符号显示在几何实体模型的体、面、线或关键点上；而有限元模型上加载的荷载，则显示在节点或单元上。显示符号的设置如下。

- 命令：/PBC/PSF/PEF/PICE/PSYMB。
- GUI：UtilityMenu > Plotcrls > Symbol。

选择 Utility Menu > Plot > Volumes（Areas，Lines）等命令，仅显示几何实体模型加载的情况；若选择 Plot > Element，则仅显示有限元模型加载情况；若选择 Plot > Multi_Plots，则显示全部加载情况。

注意： 通过图形显示仅仅能够看到加载和约束的基本情况。需要知道具体的加载位置和大小，应选择 Main Menu > List > Loads 子菜单中的相关命令。

2. 荷载的删除

对于已施加在几何模型上或有限元模型上的荷载，可以进行删除操作。

- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > All Load Data > All Forces > On All Nodes 命令。
- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Force/Moment 命令。

5.4 设定分析类型与求解方法

在使用 ANSYS 进行实际分析时，对于大多数应用，都需要对其求解过程进行控制设置。这些设置主要包括：

- 分析类型设置。
- 求解基本选项设置。

求解的过程大部分是由计算机自动完成的。在完成建模和加载工作后，就可以直接进行 ANSYS 求解了。

路径：Main Menu > Solution > Slove > Current LS。

5.4.1 分析类型设置

在建模之前已经作过 GUI 参数过滤设置，目的在于隐藏无关的菜单和命令，使操作简化。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preferences 命令，在弹出的 Preferences for GUI Filtering 对话框中对分析类型进行设置，如图 5-28 所示。

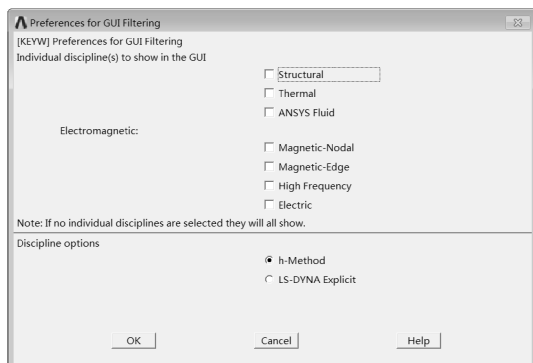


图 5-28 设置基础分析模块

在此以土木工程为例进行说明。在土木工程中，我们用得最多的是 Structural，即结构分析。

注意：结构分析也有多种类型，ANSYS 默认的结构分析类型是静力分析（Static）。当要改变分析类型时，如模态分析、谐分析、瞬态分析等，需要采用以下方式进行设置。

- 命令：ANTYPE，Antype，Status，LDSTEP，SUBSTEP。
- GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis。

5.4.2 分析基本选项设置

求解前先设定分析类型（路径：Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis）如图 5-29 所示。

再通过路径 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol′n Controls，在弹出的 Solution Controls 对话框中进行分析基本选项的设置，如图 5-30 所示。

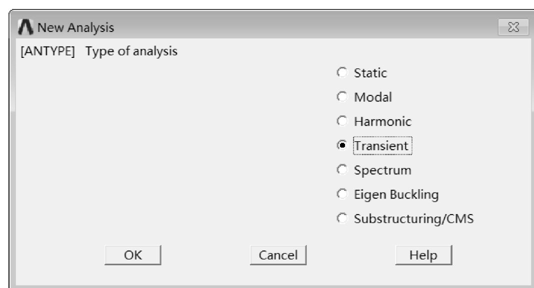


图 5-29 设置分析类型

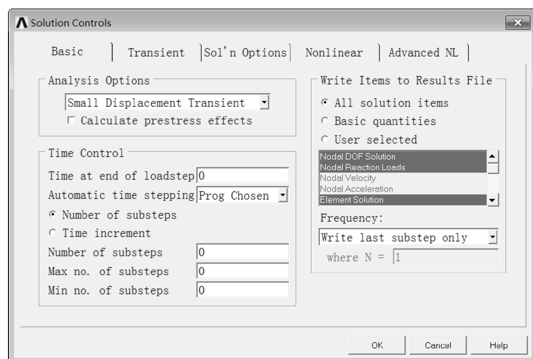


图 5-30 设置分析选项

在 Solution Controls 对话框中有 5 个选项卡，这里重点介绍 Basic 选项卡。

- Analysis Options：设置线性/非线性问题、小变形/大变形问题……。
- Time Control：时间控制。这是求解控制中的一个重要部分。

在结构分析中，ANSYS 使用时间作为一个过程参数，而不论分析结果是否依赖于时间。这样做的好处是，在所有的情况下，以一个通用的“计数器”来反映分析历程。此外，时间的单调增加与分析过程一致。

显然，在瞬态分析、蠕变分析中，ANSYS 的“时间”代表了实际的时间；然而在不依赖时间的静态分析或模态分析中，时间仅仅是一个识别荷载步与子步的计数器。

Time Control 选项组中的 Time at end of loadstep 框，就是用于设置这个时间计数器的终止时间，例如将其设置为 1。注意，如果设置为 0 或留空，则 ANSYS 使用默认时间值 1。

在设置了终止时间后，就可以设置时间子步。所谓时间子步，就是将分析过程进行人为分段，使有限元方程在迭代求解过程中分段进行，最终获得目标结果的正确值。例如，在 Number of substeps 框中输入 4，则表示将时间过程等分为 4 个部分进行分段迭代。若终止时间 = 1，则它等同于设置每个时间子步 = 0.25。

注意： Time Control 栏中还有一个 Automatic time stepping（自动时间子步）下拉列表框，如果将其打开，在某一个迭代子步不收敛或很难收敛的情况下，ANSYS 会自动将该子步进行二等分。该设置主要在不明确求解子步是否设置得合适的情况下使用。

5.5 荷载步文件法

一个荷载步是指边界条件和荷载项的一次设置或一种工况。若希望使用荷载步文件法求解，则需要将每一个荷载步的加载情况依次写到相应的荷载步文件中。

将荷载步文件命名为 jobname. sxx（其中“xx”表示荷载步号），然后再用一条命令来读入每个荷载步文件并开始逐个求解。

5.5.1 荷载步文件的建立

（1）定义一个荷载步的边界条件和加载情况。

（2）写入第一个荷载步文件。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Write LS File 命令，在弹出的 Write Load Step File 对话框中进行设置，如图 5-31 所示。

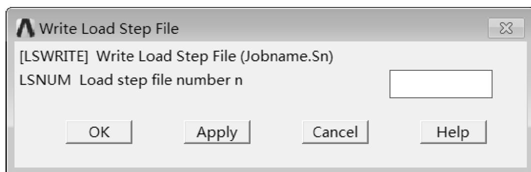


图 5-31 写荷载步文件

（3）按第 2 个边界条件、加载情况修改模型，即定义第 2 个荷载步。

（4）写入第 2 个荷载步文件……直到全部定义完毕。

5.5.2 荷载步文件法求解

用户可以在当前设置下对问题直接求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

也可以用荷载步文件法求解：在 GUI 界面中选择 Solution > Solve > From LS File 命令，在弹出的图 5-32 所示对话框中输入荷载步文件的开始文件与终止文件的编号，并设置文件的增量，然后单击 OK 按钮即可。

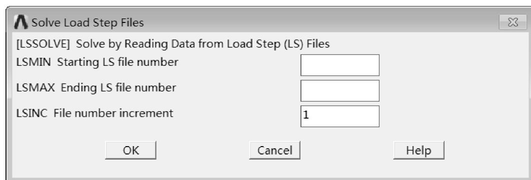


图 5-32 通过荷载步文件求解

5.5.3 荷载步文件的查看、修改或删除

对于已经生成的荷载步文件，想要查看、修改或删除，可通过如下路径来实现。

- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Read LS File 命令，查看并修改文件。
- 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Operate > Delete LS Files 命令，删除文件。

5.6 本章小结

本章为读者介绍了 ANSYS 有限元分析的加载与求解过程。本书所提到的力、荷载、边界等概念均为广义概念，不同学科中荷载的概念均不相同。位移、力、力矩、温度、电压等物理量均可以作为荷载进行施加。

在使用 ANSYS 进行实际分析时，对于大多数应用需要对其求解过程进行控制设置。这些设置主要包括：

（1）分析类型设置。

（2）求解基本选项设置。

在工程实际问题中，结构的荷载、边界条件可能存在几种工况。为了让 ANSYS 自动完成全部工况的计算分析，引入了荷载步的概念和荷载步文件法。

通过本章的学习，有助于读者在以后的应用中对各种加载及求解方式进行正确而高效的选用。

第 6 章　求解与后处理

所谓后处理，即完成求解后对所获得的结果数据进行分析处理。后处理可在求解完后直接进行，也可在重新进入 ANSYS 后读入文件进行后处理。

ANSYS 有两个后处理器：

（1）通用后处理器 POST1：查看整个模型在某个荷载步的某个子步、某个结果序列、某一特定时间或频率下的结果。

（2）时间历程后处理器 POST26：查看模型上的指定点的特定结果相对于时间、频率或其他结果项的变化。

本章学习目标

- 熟练掌握通用后处理器的各项功能
- 熟练应用时间历程后处理器

6.1　通用后处理器

通用后处理器即 POST1，用于分析、处理整个模型在某个荷载步的某个子步、某个结果序列、某一特定时间或频率下的结果。

6.1.1 读入结果文件

求解过程中可以使用 OUTRES 命令指示 ANSYS 按照指定的时间间隔将选定的结果写入结果文件中，结果文件的类型取决于其分析类型。

- . rst：结构分析。
- . rth：热分析。
- . rmg：电磁分析。
- . rfl：FLOTRAN 分析。
- . rst 或 . rth：对于其他流体分析，文件扩展名为 . rst 或 . rsh，取决于是否给出结构自由度。

进入 ANSYS 后，再进行后处理，需要将模型数据（DB）和结果数据（RST）读入到当前数据库。读入结果文件的相关操作路径汇总如下。

在 GUI 界面中选择：

- Main Menu > General Postproc > List Results > Detailed Summary。
- Main Menu > General Postproc > List Results > Detailed Summary（Freq ordered）。

- Main Menu > General Postproc > Results Summary。
- Main Menu > General Postproc > Results Summary (Freq ordered)。
- Utility Menu > List > Results > Load Step Summary。

根据需要读入指定荷载步的计算结果：

- Main Menu > General Postproc > Read Results > By Load Step。
- Main Menu > General Postproc > Read Results > By Pick。
- Main Menu > General Postproc > Read Results > By Pick (Freq ordered)。
- Main Menu > General Postproc > Read Results > First Set。
- Main Menu > General Postproc > Read Results > Last Set。
- Main Menu > General Postproc > Read Results > Next Set。
- Main Menu > General Postproc > Read Results > Previous Set。

通过命令流方法可以得到同样的操作结果，在 APDL 专题中将详细介绍。为方便读者查阅，现汇总相关命令见表 6-1。

表 6-1 读入结果文件及其命令

命 令	功 能	备 注
INRES	指定从结果文件恢复的数据	影响 SET、SUBSET 及 APPEND
FILE	指定拟读入的结果文件	对该结果文件进行后处理
SET	从结果文件中读出指定的数组	读出并可同时进行缩放、插值等运算
SUBSET	为所选择的模型读入结果	需有模型数据
APPEND	从结果文件读入数据追加到当前数据库	需有模型数据
LCZERO	将数据库中的结果置零	便于多次荷载工况组合
RESUME	恢复模型数据库	通常不必使用

6.1.2 分析结果的绘图显示

分析结果可以通过绘图或者列表的形式显示。

1. 绘制变形图

路径：

- Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape。
- Utility Menu > Plot > Results > Deformed Shape。

通过上述路径，打开 Plot Deformed Shape 对话框，如图 6-1 所示。

这里有 3 个选项：选择 Def shape only，显示变形后的形状；选择 Def + undeformed，则显示变形后的形状以及变形前的网格；选择 Def + undef edge，则显示变形后的形状以及变形前的轮廓线，效果如图 6-2 所示。

2. 变形动画

以动画方式模拟结构在静力作用下的变形过程：Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Deformed Shape。

3. 绘制云图

在 ANSYS 通用后处理中，可以显示位移及应力应变等沿模型分布的云图。分为按节点和按单元两种显示模式。

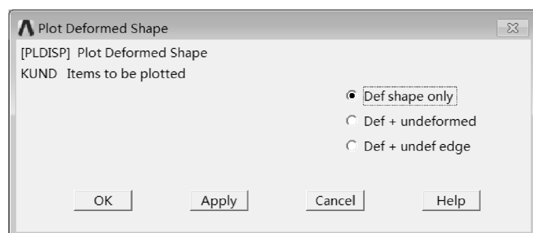


图 6-1　绘制变形图选项

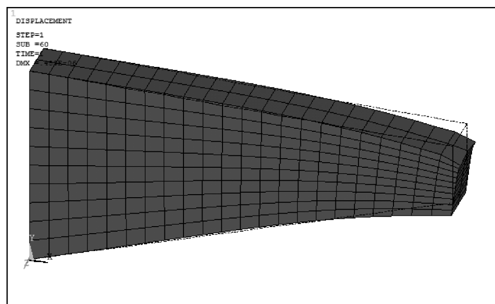


图 6-2　Def + undef edge 效果

路径：

- 按节点：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu。
- 按单元：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Element Solu。

以按节点求解为例，打开 Contour Nodal Solution Data 对话框，如图 6-3 所示。

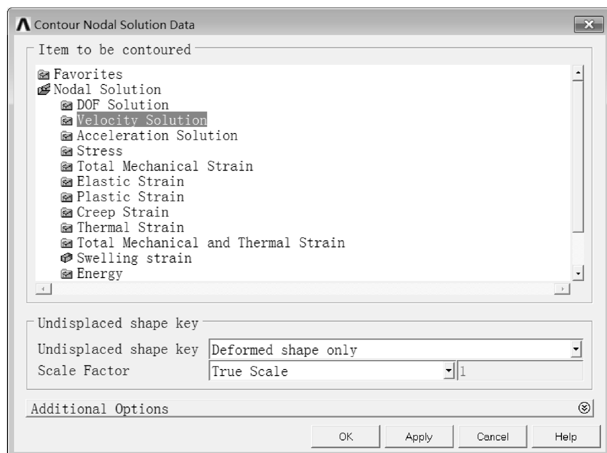


图 6-3　绘制按节点求解云图对话框

选择 DOF Solution，可绘制各个方向的位移云图以及 3 个方向位移的总和云图等。

选择 Velocity Solution，可针对速度的求解结果绘制云图。

选择下方的 Acceleration Solution、Stress、Total Mechanical Strain、Elastic Strain、Plastic Strain 等，可以针对加速度、应力、总的机械应变、弹性应变、塑性应变等一系列的求解结果绘制云图。

在此以 UZ 及 SZ 为例，UZ 绘图效果如图 6-4 所示，SZ 绘图效果如图 6-5 所示。

注意：在按单元求解的云图绘制中，有类似的操作方法，但是没有 DOF 项。例如，SZ 按单元绘制效果如图 6-6 所示。

4. 等值线图

选择 Utility Menu > PlotCtrls > Device Options 命令，弹出 Device Options 对话框，如图 6-7 所示。在该对话框中选中［/DEVI］Vector mode（wireframe）右侧的 On 复选框，即打开矢量图的绘制功能，从而得到等值线图。

此时再回到 Nodal Solu 对话框中，得到的各变形图及云图即为等值线分布图。变形图如图 6-8 所示，UZ 等值线图如图 6-9 所示。

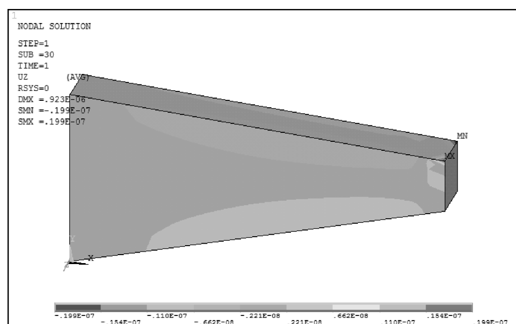


图 6-4　UZ 云图（Nodal Solution）

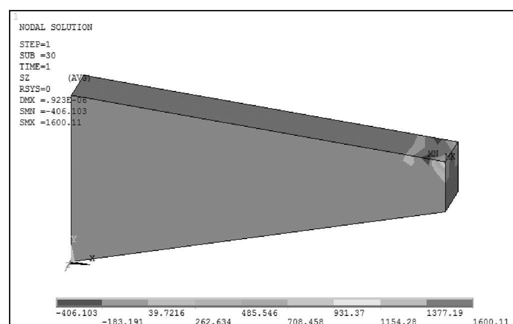


图 6-5　SZ 云图（Nodal Solution）

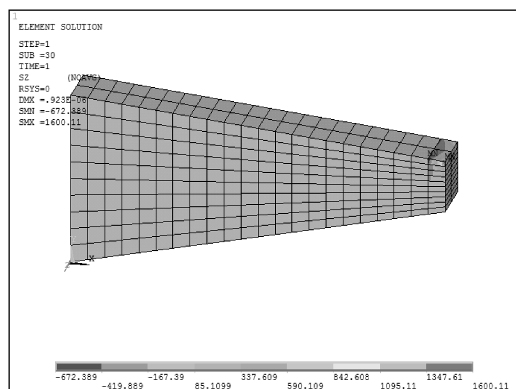


图 6-6　SZ 云图（ELEM Solution）

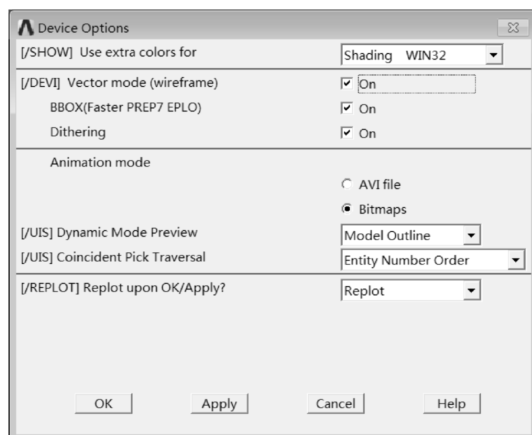


图 6-7　Device Options 对话框

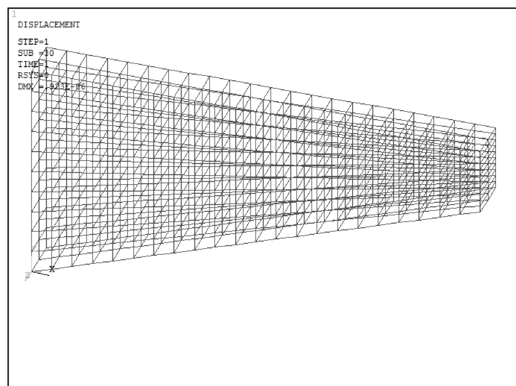


图 6-8　变形图

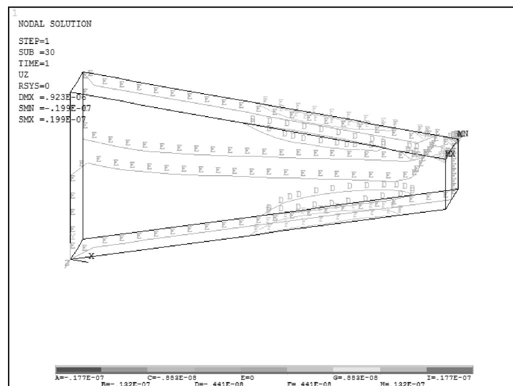


图 6-9　UZ 等值线图

技巧：在一些孔洞模型中，有时很难直接查看到内部情况，此时通过查看等值线来得到内部分布图是很方便的。

按节点求解的应力等值线图如图 6-10 所示，按单元求解的应力等值线图如图 6-11 所示。

5. 以路径方式显示计算结果

用户可以使用 GUI 界面中的如下命令来通过设定路径显示计算结果。

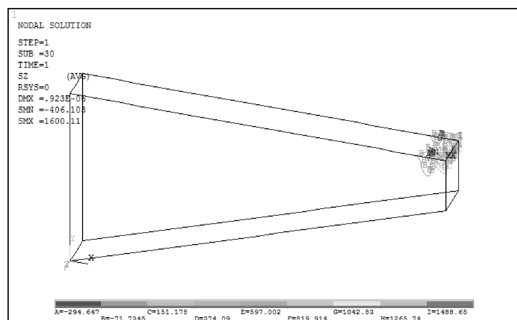


图 6-10 SZ（Nodal Solution）

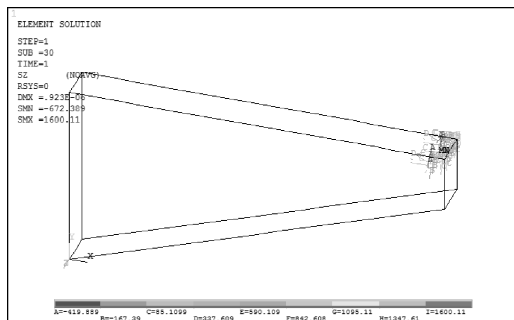


图 6-11 SZ（ELEM Solution）

- Main Menu > General Postproc > Path Operations > Plot Path Item > On Graph。
- Main Menu > General Postproc > Plot Results > Plot Path Item > On Graph。
- Utility Menu > Plot > Results > Path Plot。

在弹出的图 6-12 所示 Plot of Path Items on Graph 对话框中选择要显示的路径单元，然后单击 OK 按钮即可。

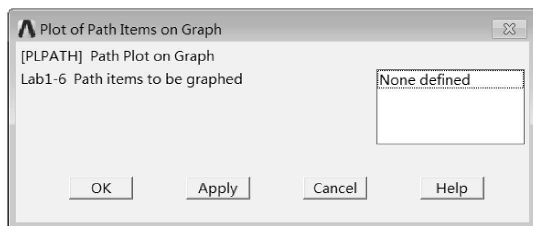


图 6-12 Plot of Path Items on Graph 对话框

用户只能显示已经定义的路径，定义路径可以使用 PATH 命令。

在通用后处理器中：

- Main Menu > General Postproc > List Results > Path Items。
- Main Menu > General Postproc > Path Operations > Archive Path > Retrieve > Path from array。
- Main Menu > General Postproc > Path Operations > Archive Path > Retrieve > Paths from file。
- Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > By Location。
- Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > By Nodes。
- Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > On Working Plane。
- Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > Path Status > Defined Paths。
- Main Menu > General Postproc > Path Operations > Recall Path。

在前处理器中：

- Main Menu > Preprocessor > Path Operations > Define Path > By Location。
- Main Menu > Preprocessor > Path Operations > Define Path > By Nodes。
- Main Menu > Preprocessor > Path Operations > Define Path > On Working Plane。
- Main Menu > Preprocessor > Path Operations > Define Path > Path Status > Defined Paths。

- Main Menu > Preprocessor > Path Operations > Recall Path。
- Main Menu > Preprocessor > Path Operations > Retrieve > Paths from file。
- Utility Menu > List > Status > General Postproc > Path Operations。

弹出拾取节点提示后，在工作区中选择节点，然后单击 OK 按钮，在弹出的定义路径的 By Nodes 对话框中输入参数，单击 OK 按钮，即可在弹出的路径列表中看到定义好的路径。

6. 显示边界条件及支反力

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Symbols 命令，弹出 Symbols 对话框，如图 6-13 所示。

在该对话框中进行相应的设置，即可指定是否显示边界条件、支反力。显示约束（边界条件）如图 6-14 所示，显示支反力如图 6-15 所示，同时显示约束（边界条件）及支反力如图 6-16 所示。

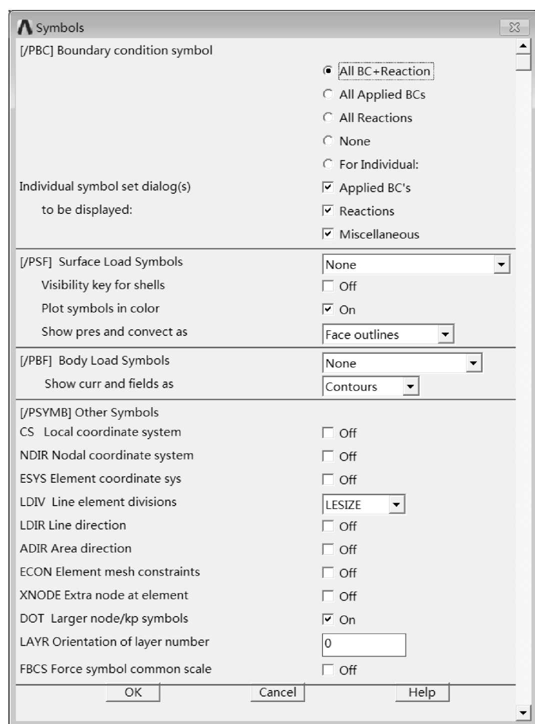


图 6-13 设置显示支反力和边界条件

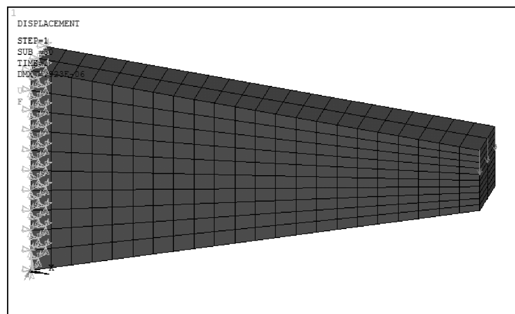


图 6-14 显示约束（边界条件）

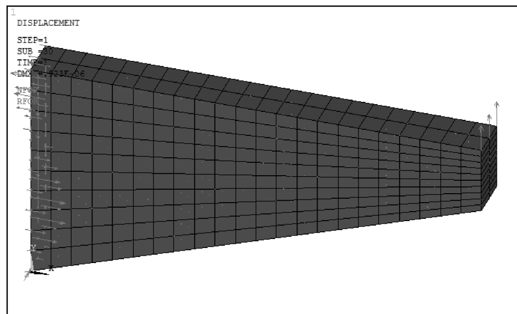


图 6-15 显示支反力

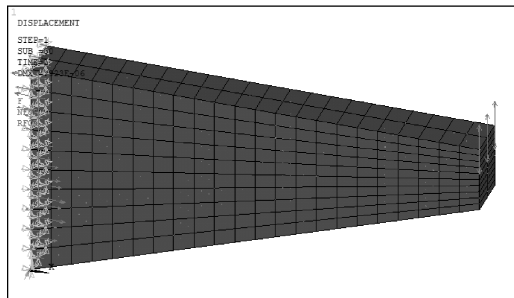


图 6-16 同时显示约束（边界条件）和支反力

6.1.3 结果查看器

在 GUI 界面中，选择 Main Menu > General Postproc > Results Viewer 命令，进入结果查看器，如图 6-17 所示。

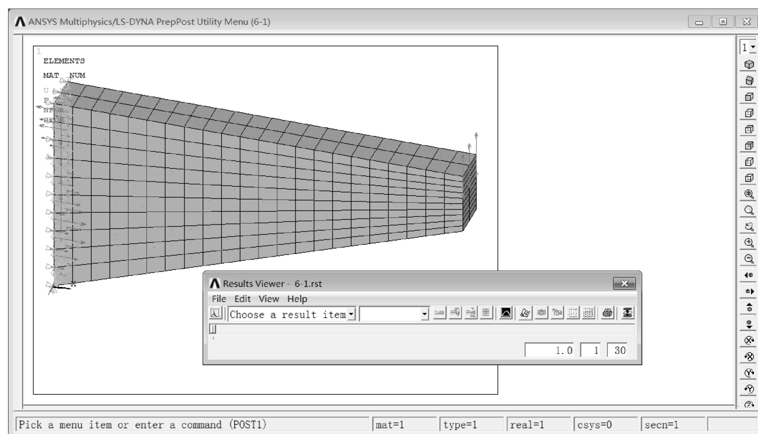


图 6-17 结果查看器

图 6-18 所示为结果查看器的控制窗口。

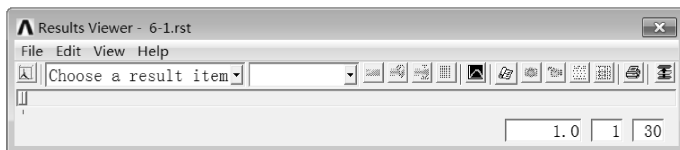


图 6-18 结果查看器控制窗口

在这个控制窗口中，可以实现通用后处理器的大部分功能。

在如图 6-19 所示可显示对象下拉列表框中，可以选择要显示在工作区中的项目（如节点解、单元解、支承反力等），如图 6-20 所示。



图 6-19 选择显示对象的下拉列表框

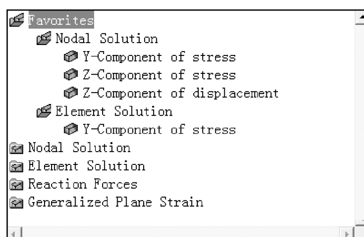


图 6-20 可显示对象列表

在图 6-21 所示工具栏中，从左至右分别是显示结果按钮、查询结果按钮、显示结果动画按钮、结果列表按钮、进入时间历程后处理器按钮、报告生成器按钮、捕捉图像按钮、捕捉动画按钮、捕捉结果列表按钮、打印按钮、显示隐藏窗口按钮。



图 6-21　工具栏

在图 6-22 所示时间轴上，可以控制显示的荷载步或时间点。

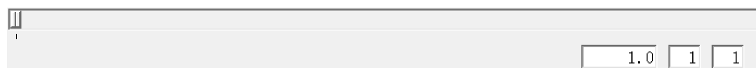


图 6-22　时间轴

灵活运用结果查看器可以直观地观察分析结果，方便地比较不同场分析的结果。

6.1.4 分析结果的列表显示

与图形显示方式相对应，在 ANSYS 中可以列表显示结果。结果项基本与图形显示方式相对应，但是可以将结果数字化，这样方便数据的整理。

1. 列表显示计算结果

在 GUI 界面中选择下列命令之一。

- Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution。
- Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Nodes。
- Utility Menu > List > Results > Nodal Solution。

打开 List Nodal Solution 对话框，如图 6-23 所示。其中各选项功能与绘图时的 Nodal Solution 对话框中的相应选项一样，在此不再赘述。

得到的 LIST 如图 6-24 所示。

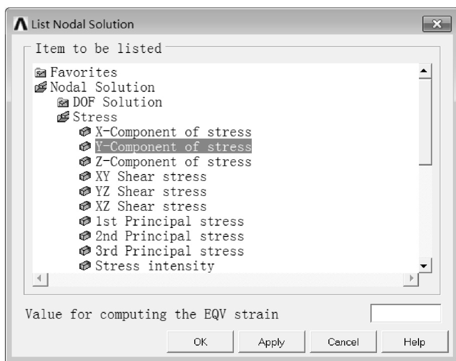


图 6-23　List Nodal Solution 对话框

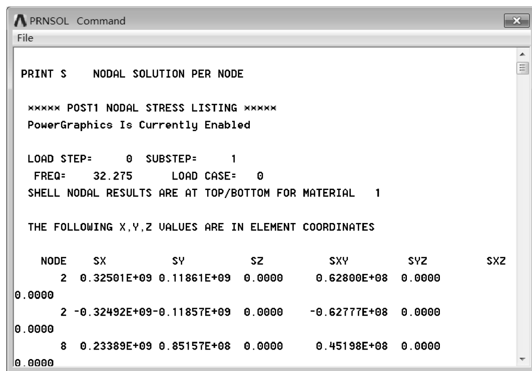


图 6-24　Z 方向节点应力（SZ）列表

用户同样可以得到单元解的列表。路径如下。

- Main Menu > General Postproc > List Results > Element Solution。
- Utility Menu > List > Results > Element Solution。

操作方式类似。

2. 单元表的排序

可以使用 GUI 界面中的如下命令对单元表进行排序。

- Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Nodes。

- Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data。

在弹出的图 6-25 所示 Sort Nodes 对话框中，选择要控制的排序项，单击 OK 按钮即可。

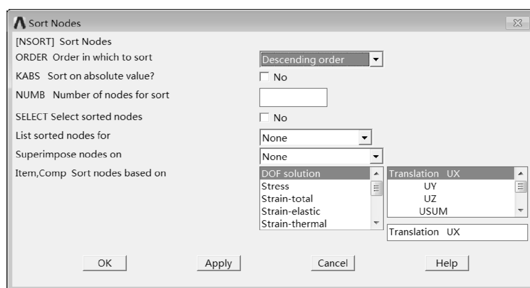


图 6-25 Sort Nodes 对话框

当需要恢复 ANSYS 默认的排序方式时，可以使用 NUSORT 命令。也可以在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing > Unsort Nodes 命令，弹出 Unsort Nodes 提示对话框，单击 OK 按钮确认即可。

对于单元解，有相同的操作方式。路径如下。

Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Elems。

单元解的默认排列方式是以单元号升序排列。

如要恢复单元解默认排列方式，可以在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing > Unsort Elems 命令。

3. 列出支反力

可以在 GUI 界面中通过下列路径得到支反力结果。

- Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu。
- Utility Menu > List > Results > Reaction Solution。

在弹出的图 6-26 所示 List Reaction Solution 对话框中，选择要列表的对象，单击 OK 按钮即可。如图 6-27 所示为列出 FY。

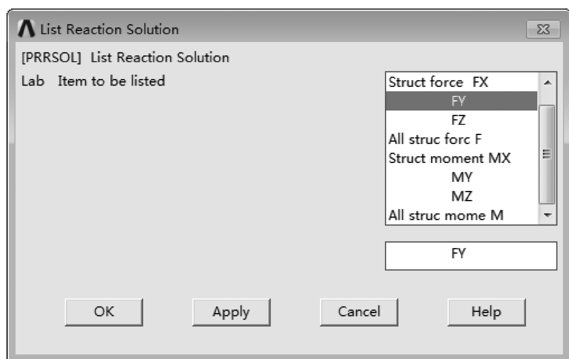


图 6-26 List Reaction Solution 对话框

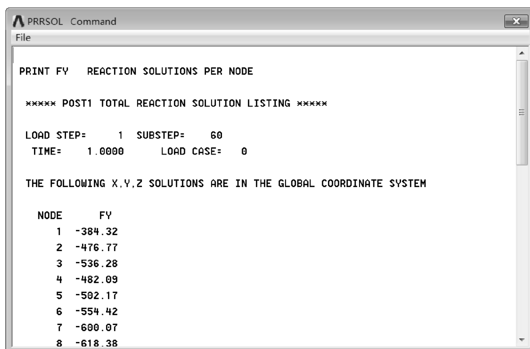


图 6-27 Y 方向节点支反力列表

4. 列出节点荷载总和

可以通过如下路径得到指定节点的荷载总和。

- Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Loads。
- Utility Menu > List > Results > Nodal Loads。

在弹出的图 6-28 所示 List Nodal Loads 对话框中，选择要列表的对象，单击 OK 按钮即可。如图 6-29 所示为列出 FY 的值。

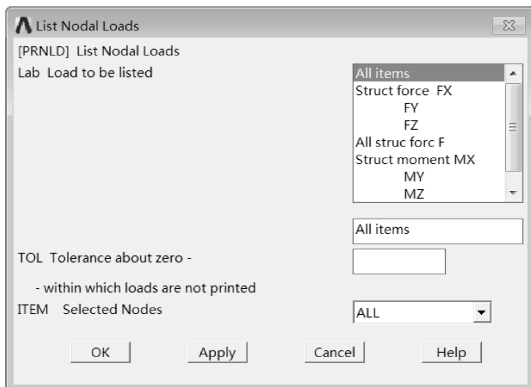


图 6-28 List Nodal Loads 对话框

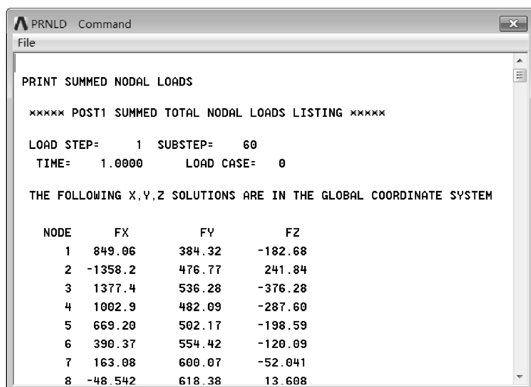


图 6-29 Y 方向节点荷载列表

5. 列出求解结果的矢量与方向

用户可以得到指定结果类型的矢量大小与方向余弦，路径如下。

- Main Menu > General Postproc > List Results > Vector Data。
- Utility Menu > List > Results > Vector Data。

通过以上任一路径，打开图 6-30 所示的 List Vector Data 对话框，选择要列表的矢量，单击 OK 按钮即可。图 6-31 所示为列表显示位移矢量。

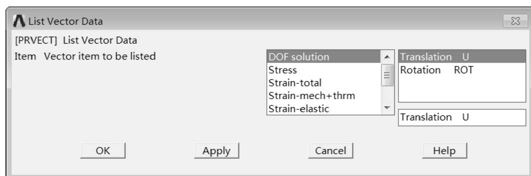


图 6-30 List Vector Data 对话框

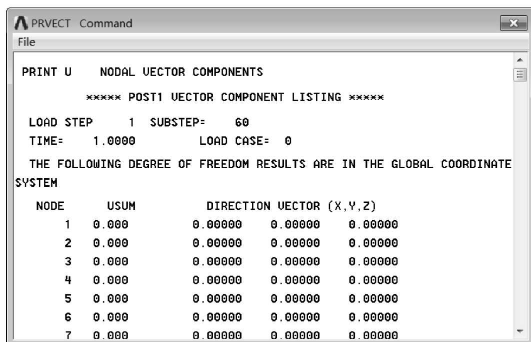


图 6-31 位移矢量数据列表

6.1.5 结果的运算处理

ANSYS 的通用后处理器可以对结果进行一定的处理，方便用户的进一步分析使用。这些特殊结果包括求和、强度因子、积分等。可以使用的命令见表 6-2。

表 6-2 特殊结果处理命令

命　　令	功　　能
FSUM	节点力求和（对所选单元节点力和节点弯矩进行求和）
NFORCE	节点力求和（计算每个所选节点上的节点力和节点弯矩，并对所选节点相关单元进行求和）
SPOINT	定义力矩求和的位置点
KCALC	计算强度因子
INTSRF	对外表面节点结果积分

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Total Force Sum 命令，在弹出的图 6-32 所示 Caculate Total Force Sum for All Selected Nodes 对话框中进行相应的设置，然后单击 OK 按钮，得到节点力的合力。

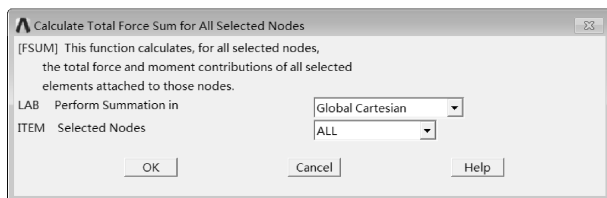


图 6-32　Caculate Total Force Sum for All Selected Nodes 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Sum at Each Node 命令，在弹出的图 6-33 所示 Calculate Force/Moment Sum at Each Node 对话框中进行相应的设置，然后单击 OK 按钮，得到各节点的力与力矩之和。

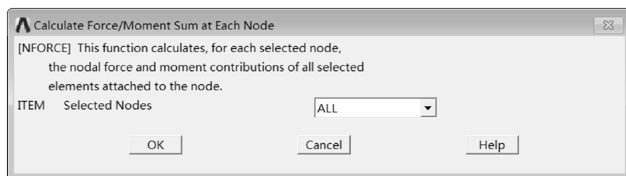


图 6-33　Calculate Force/Moment Sum at Each Node 对话框

选择如下路径之一可以定义力矩的求解位置。

- Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Summation Pt > At Node。
- Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Summation Pt > At XYZ Loc。

两者分别为定义在节点位置与定义在坐标位置，在弹出的拾取对话框的提示下拾取所需要的点即可。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Stress Int Factr 命令，在弹出的图 6-34 所示 Stress Intensity Factor 对话框中进行相应的设置，然后单击 OK 按钮，可得到断裂力学分析中的力学强度因子。

此外，还可以计算分布荷载的总和，如面荷载、体积荷载等。在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Surface Integral，弹出图 6-35 所示的 Integrate Scalar Value over Selected Nodes 对话框中，选择要求积分的项，单击 OK 按钮。

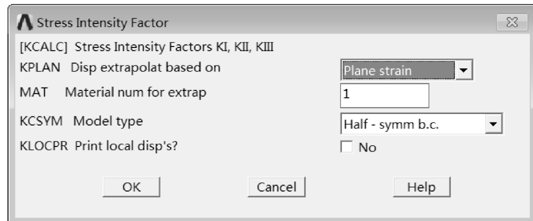


图 6-34　Stress Intensity Factor 对话框

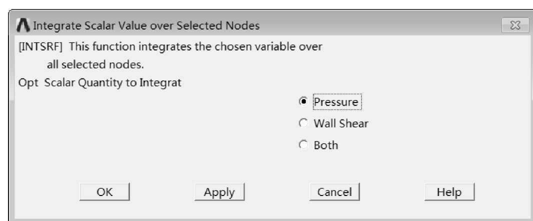


图 6-35　Integrate Scalar Value over Selected Nodes 对话框

6.1.6 转换结果到不同的坐标系

结果数据包括位移（UX、UY 、ROTX 等）、梯度（TGX、TGY 等）、应力（SX、SY、SZ 等）、应变（EPPLX、EPPLXY 等）等，这些数据以节点坐标系或单元坐标系存入数据库和结果文件中。在通用后处理器中查看这些结果数据时，通常要转换到激活的结果坐标系中（默认为全局笛卡儿坐标系），以便在工作区中以图形或列表形式显示出来。

使用 RSYS 命令可以转换激活的坐标系，如图 6-36 所示。

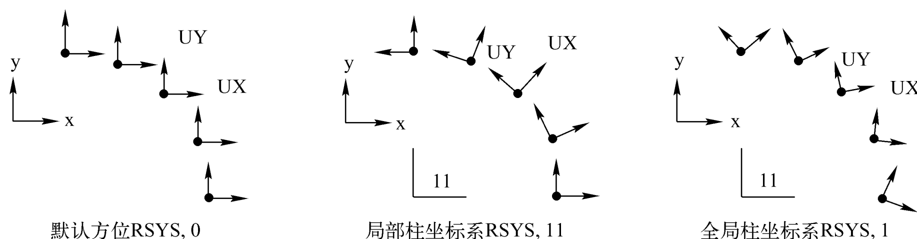


图 6-36 使用 RSYS 命令转换坐标系

用户可以在 GUI 界面中通过如下路径完成坐标系的转换。

- Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Rotate Node CS > To Active CS。
- Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Rotate Node CS > To Active CS。
- Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS。
- Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Rotate Node CS > By Angles。
- Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Rotate Node CS > By Angles。
- Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Rotate Node CS > By Vectors。
- Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Rotate Node CS > By Vectors。
- Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > RotateNode > To Surf Norm > On Areas。

6.1.7 荷载工况

荷载工况操作是利用当前数据库（在内存中）的数据和另外的荷载工况数据（在结果文件或荷载工况文件中）进行运算和组合，即利用荷载工况及其运算不断改变当前数据库中的结果数据。所有的图形显示和列表都是基于当前数据库中的结果，荷载工况不过是个手段。

1. 荷载工况

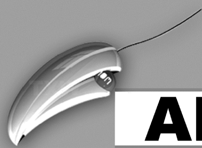
荷载工况是指一组被赋予任意编号的结果数据。可以将某几个荷载步组合为荷载工况 1，或将某个时间点的荷载工况结果定义为荷载工况 2，最多可以定义 99 个荷载工况。在数据库中一次只能存储一个荷载工况。定义和读取荷载工况的 GUI 路径如下。

- Main Menu > General Postproc > Load Case > Create Load Case。
- Main Menu > General Postproc > Load Case > Read Load Case。

2. 荷载工况运算

荷载工况之间的运算，运算结果将改写数据库中的结果数据部分，可以列出及显示荷载工况组合。

用户可以在 GUI 界面中通过如下路径进行操作。



Main Menu > General Postproc > Load Case > Operation。

其中 Operation 在主菜单中对应各种具体运算，如 Add、Subtract、Square 等。

例如下面一段命令流给出了简单的荷载工况操作：

```
lcdef,1,3
lcdef,2,5
lcase,1
lcoper,min,2
```

上述命令的意思是，分别将荷载工况 1 定义为荷载步 3、荷载工况 2 定义为荷载步 5，然后读入荷载工况 1，将之与荷载工况 2 进行比较，然后取最小值读入内存。

相应的 GUI 操作如下。

（1）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Load Case > Create Load Case 命令，弹出图 6-37 所示的 Create Load Case 对话框。

（2）在该对话框中选择从 Results file（结果文件）创建荷载步，单击 OK 按钮，弹出图 6-38 所示的 Create Load Case from Results File 对话框。

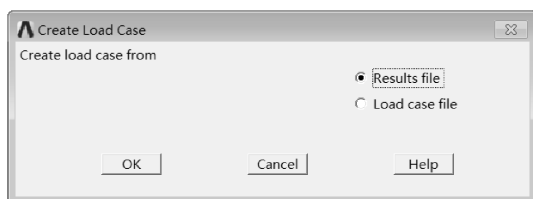


图 6-37 Create Load Case 对话框

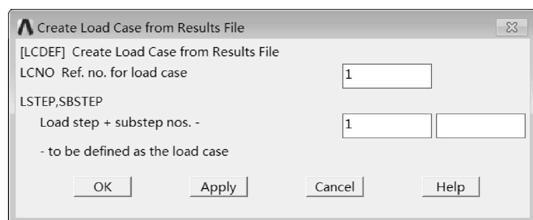


图 6-38 Create Load Case from Results File 对话框

（3）在 Create Load Case from Results File 对话框中的 LCNO Ref. no. for load case（荷载工况编号）框中输入 1，在 LSTEP（荷载步）框中输入 3，单击 Apply 按钮。

（4）当再次弹出图 6-37 所示 Create Load Case 对话框时，重复上述操作，将荷载工况编号设置为 2，荷载步设置为 5，单击 OK 按钮。

（5）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Load Case > Read Load Case 命令，弹出图 6-39 所示的 Read Load Case 对话框。在 LCNO Ref. no. of load case（荷载工况编号）框中输入将要读入的荷载工况编号 1，单击 OK 按钮。

（6）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Load Case > Min&Max 命令，弹出如图 6-40 所示的 Minimum and Maximum of Load Cases 对话框。选择 Oper Type of Comparison 为 Algebraic min，在 LCASE1 1st Load Case 框中输入 1，在 LCASE2 2nd Load Case 框中输入 2，单击 OK 按钮。

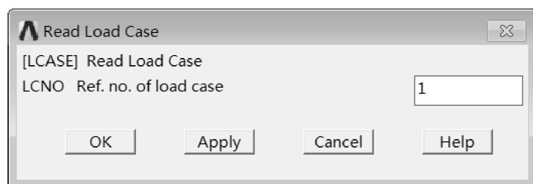


图 6-39 Read Load Case 对话框

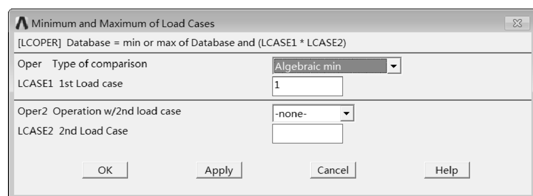


图 6-40 Minimum and Maximum of Load Cases 对话框

6.2 时间历程后处理器

ANSYS 的另一个后处理器是时间历程后处理器，即 POST26。

6.2.1 时间历程后处理对话框介绍

时间历程后处理器（POST26）的 GUI 界面功能强大。在分析结束后，选择 Main Menu > TimeHist Postpro 命令，弹出 Time History Variables 对话框，如图 6-41 所示。

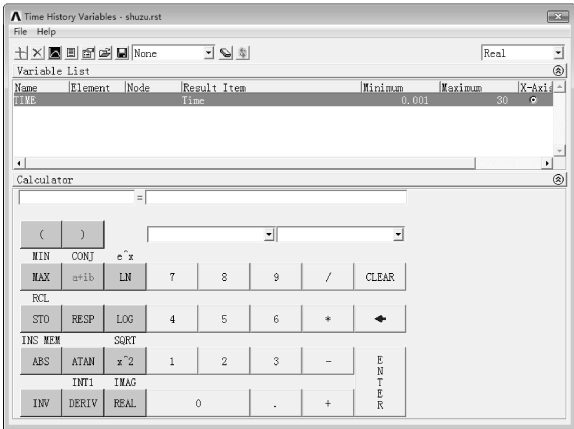


图 6-41 时间历程后处理窗口

在该对话框中可以完成所有主要的时间历程后处理操作，如管理要处理的数据、绘制曲线、进行一定的数学处理等。

图 6-42 所示工具栏中各项（从左到右）功能，见表 6-3。

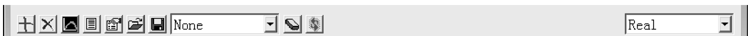


图 6-42 工具栏

表 6-3 工具栏中各项功能

按 钮	功 能
添加变量	打开 Add Time – History Variables（添加时间历程变量）对话框
删除变量	从变量列表中清除选定的变量
绘制曲线	根据预定义的属性绘制最多 10 个变量的曲线
列表显示数据	列出最多 6 个变量的数据，包括极值
属性	选定变量的属性
导入数据	将数据导入变量空间
导出数据	将数据导出到一个文件
数据叠加	将选中的数据叠加
清除时间历程数据	清除所有的变量，并恢复其默认设置（复位）

（续）

按　　钮	功　　能
刷新数据	更新变量列表
查看结果	在下拉列表框中选择复杂的变量（即实、虚、振幅或相位）输出形式

图 6-43 所示为 Variable List（变量列表），在此显示用户添加的要进行处理的数据。



图 6-43　变量列表

图 6-44 所示为 Calculator（计算）区域，具有一定的数学运算能力，可以进行一定的数学处理。



图 6-44　计算区域

计算区域可以进行的处理见表 6-4 所示。

表 6-4　计算区域功能

按　　钮	功　　能
括号	使用括号
MAX/MIN	查找最大值/最小值
LN/e^x	自然对数/指数
STO/RCL	存储/清空内存
LOG	求对数
ABS/INS MEM	绝对值
ATAN	反正切
X^2/SQRT	平方/开方
INV	启用备用计算功能
DERIV/INT	求导/求积分
REAL/IMAG	提取复变量的实部/虚部
数字键	输入数字
/	除法
*	乘法

（续）

按　　钮	功　　能
-	减法
+	加法
CLEAR	清除
←	删除最后一位
ENTER	确定

6.2.2 定义变量

时间历程后处理器 POST26 用于处理模型中的指定点的特定结果相对于时间、频率或其他结果项的变化，主要应用于动力学分析或非线性分析中，如动位移－时间关系、荷载－位移曲线等。POST26 的操作均基于变量，即定义变量后的所有操作均针对变量。

定义变量有多种方式，如通过 Time History Variables 对话框定义、使用相应的命令定义等。

先来看一下如何通过 Time History Variables 对话框定义变量。在 GUI 界面中选择 Main Menu > TimeHist PostPro 命令或输入/POST26 命令，进入时间历程后处理器。

单击 Variable Viewer，即可打开 Time History Variables 对话框，如图 6-45 所示。单击左上角的绿色按钮，弹出如图 6-46 所示的 Add Time－History Variable 对话框。

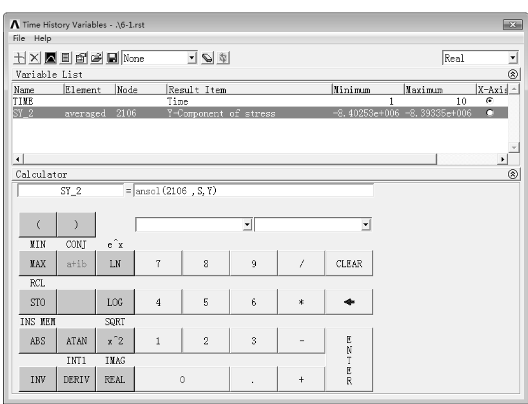


图 6-45　Time History Variables 对话框

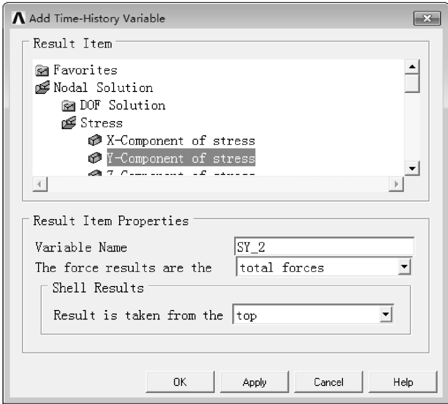


图6-46　Add Time－History Variable 对话框

在 Result Item 列表框中选择要添加的数据，在下方的 Result Item Properties 选项组中进行相应的设置，单击 OK 按钮，即可完成变量定义。定义好的变量将显示在如图 6-45 所示对话框中。

用命令定义变量时实际上是建立了一个变量号与结果数据项的关系，而并没有从结果文件读入变量数据到数据库中（称为存储变量），即命令方式的变量定义与变量存储是分两步完成的。定义变量的命令见表 6-5。

表 6-5 定义变量命令

命 令	功 能	备 注
NSOL	以节点数据定义变量	节点结果，如自由度等
ESOL	以单元的节点数据定义变量	导出结果数据
RFORCE	以节点反力定义变量	如 F 或 M 的分量
EDREAD	以显式动力分析结果定义变量	适用于 LSDYNA 模块
GAPF	以间隙力定义变量	类同常用图素删除命令
ANSOL	以平均的节点数据定义变量	导出的结果数据，如应力等
SOLU	以结果总体数据定义变量	PRITER 命令可直接输出
NUMVAR	定义 POST26 中允许的变量数	不能超过 200 个
TVAR	以平衡迭代次数替代 TIME 变量	
VARNAM	为变量命名或重命名	给变量一个识别符以显示
TIMERANGE	定义拟存储数据的时间范围	可减少内存占用
LAYERP26	定义取用层单元何层的数据	指定层号
FORCE	定义取用何种类型的力数据	指定静态、阻尼、惯性及总力
SHELL	定义取用 SHELL 何处的数据	指定壳顶、中及底面
STORE	指定变量存储	存储到数据库中
NSTORE	指定 TIME 点存储	
RESET	将 POST1 和 POST26 恢复默认	全部恢复到初始的默认设置

6.2.3 变量运算

利用变量运算可得到一些期望的结果。变量运算后均生成一新的变量，与原定义变量处理方法相同。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > TimeHist Postpro > Math Operations > 命令，在弹出的子菜单中选择相应的命令，可进行加减、乘、除、求绝对值、开根号、求幂、求指数对数、求导、积分、求最大值/最小值等运算。

6.2.4 变量与数组

变量与数组可以转换，可将变量赋给数组以便计算或输出等，也可以将数组赋给变量以便运算和显示等。同时，可从文件读入数据赋给变量，也可将变量赋给数组后写入文件。

1. 将变量赋给数组

路径：Main Menu > TimeHist Postpro > Table Operations > Variable to Par。

该路径将变量数据赋给数组，但该数组应事先定义。

当采用循环赋值时，可使用 * VLEN 命令控制循环次数，且对多维数组只有第 1 个下标可增加。

2. 将数组赋给变量

路径：Main Menu > TimeHist Postpro > Table Operations > Parameter to Var。

该路径通过将数组赋给变量，生成新的变量。执行该命令前至少已定义一个变量。

3. 从文件读入数据赋给变量

该方法无法以 GUI 方式进行操作，可以通过命令流进行调用。

命令流如下：

```
DATA,IR,LSTRT,LSTOP,LINC,Name,KCPLX。
```

该命令从文件读入数据生成新的变量。在被读文件的第 1 行必须为 DATA 命令及其参数，第 2 行为数据格式说明，第 3 行开始是数据。数据格式类似于 FORTRAN 语言的读入数据格式，但仅为 FORMAT 后面括号及括号中的内容。DATA 命令读入数据时不能使用整型、字符型和自由等数据格式。所建立的数据文件采用/INPUT 命令读入并执行。

如果要使用自由格式读入数据，可先用 * TREAD 命令读入表数组，然后用 VPUT 命令将表数组数据赋给变量。

6.2.5 变量的显示

定义好的变量可以在工作区中绘出曲线。

如图 6-47 所示，在 Variable List 列表框中选择要绘制曲线的变量，单击工具栏中的绘制曲线按钮（参见图 6-42），应工作区中即可显示所选变量与时间关系曲线，如图 6-48 所示。

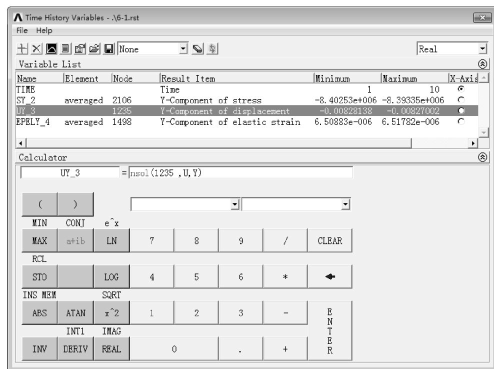


图 6-47　选择要绘制曲线的变量

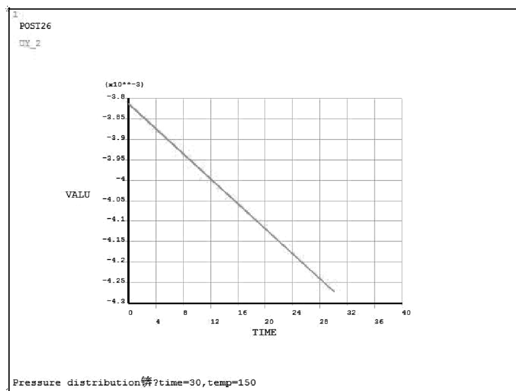


图 6-48　绘制变量 - 时间曲线

用户也可以通过命令设定坐标轴格式以及要绘制曲线的变量，相关命令见表 6-6。

表 6-6　定义坐标及变量命令列表

命　　令	功　　能	命　　令	功　能
XVAR	定义图形显示的 X 轴	NPRINT	定义列表的时间点
PLTIME	定义图形显示的时间范围	SPREAD	为后续显示打开虚线误差曲线
PLCPLX	定义图形显示复数的组成	PLVAR	图形显示变量
PRCPLX	定义列表显示复数的格式	PRVAR	列表显示变量
PRTIME	定义列表显示的时间范围	EXTREM	列表显示变量的极值
LINES	定义列表显示每页的行数		

6.3 本章小结

本章系统地讲解了 ANSYS 软件的后处理功能。ANSYS 提供了两种后处理器：通用后处理器和时间历程后处理器。

通用后处理器（/POST1）用于分析处理整个模型在某个荷载步的某个子步、某个结果序列、某一特定时间或频率下的结果，如结构静力求解中荷载步 2 的最后一个子步的压力，瞬态动力学求解中时间等于 6 s 时的位移、速度与加速度等。通用后处理器可以直接显示出计算结果的云图和计算数值的列表，也可以进行结果的运算处理，还可以进行荷载工况的加减运算等。

时间历程后处理器（/POST26）用于查看模型中某个指定点的如自由度、应力等结果相对于时间、频率等的函数关系。用户可以在 ANSYS 时间历程后处理器中进行简单的时间曲线或者复杂的频谱的绘制。时间历程后处理器在 GUI 界面中功能强大，初学用户无需通晓 APDL 语言（将在后面的章节介绍），即可方便地进行复杂的处理。/POST26 可以对结果数据进行加减、积分、微分等处理。



第 7 章 参数化设计语言

ANSYS 参数化设计语言（ANSYS Parametric Design Language，APDL）是用户进行参数化设计、处理大型复杂项目必不可少的得力助手。与图形界面（GUI）的操作方式相比，APDL 命令流方式具有更大的优势，便于修改、可使用编程控制命令、易于保存及文件处理。

7.1 参数化设计语言基础知识

与 GUI 操作方式相比，APDL 命令流方式具有巨大的优势。对于熟悉编程的用户，可以快速掌握，轻松实现参数化设计与分析过程，易于建立可反复使用、多次修改的模型，对于大型分析项目、需要反复计算处理的对象等非常适用。

7.1.1 APDL 语言的输入

在 ANSYS 17.0 的 GUI 界面中，快捷工具栏中的长条形输入框就是命令输入框，如图 7-1 中白框所示。



图 7-1 快捷工具栏

可以在命令输入框中直接输入命令，按 Enter 键执行；也可以从外部复制，然后粘贴到命令输入框中，按 Enter 键执行。

此外，用户还可以先在任何能编辑文本的程序中编写代码，并保存为文本文件，然后在 GUI 界面中选择 Utility Menu > File > Read Input from 命令，选择已编写好的代码文件，读入执行即可。

7.1.2 APDL 语言的参数

1. 参数简介

参数就是 APDL 中的变量。ANSYS 中的参数主要有标量参数和数组参数。标量参数分为数值参数和字符参数 2 种，数组参数分为数值型数组参数（也称一般数组参数）、字符型数组参数和表数组参数（一种特殊的数值型数组参数，允许自动进行线性插值）3 种。

在 ANSYS 中，定义参数的不必明确声明参数类型。所有数值参数，无论是整型还是实型，都按照双精度数进行存储。被使用但未声明的参数都被赋予一个接近 0 的值，或“极

小值”，大约为 2^{-100}。例如，若参数 A 被定义为 A = B，但 B 没有被定义，则赋给 A 一个极小值。

字符参数存储字符串，赋值方法是将字符串括在一对单引号中（字符串长度不超过 8 个字符）。

可以用一个参数（代替数值或字符串）作为任何一个 ANSYS 命令的变量，该参数被求值并被赋给命令变量。例如，把值 3 赋给参数 AA，然后执行命令：

```
N,12,AA,4
```

ANSYS 程序将把该命令解释为：

```
N,12,3,4      ! 定义节点 12 为点 X =3,Y =4
```

2. 参数的命名规则

参数名称必须以字母开头，只能包含字母、数字和下画线，且字符个数不能超过 8 个。例如，下面列出的均为无效参数名。

- NEW_VALUE（超过 8 个字符）。
- 2CF3（以数字开头）。
- M&E（含非法字符"&"）。

在命名参数时注意以下几点。

（1）避免参数名与经常使用的 ANSYS 标识字相同。例如：

- 自由度（DOF）标识字（TEMP、UX、PRES 等）。
- 常用标识字（ALL、PICK、STAT 等）。
- 用户定义标识字（如用 ETABLE 命令定义的标识字）。
- 数组类型标识字（如 CHAR、ARRAY、TABLE 等）。

（2）名称为 ARG1 ~ ARG9 和 AR10 ~ AR99 的参数被保留为局部参数，不能用来定义用户参数。

提示：*局部参数通常用于宏中。*

（3）参数名不能与用 *ABBR 命令定义的缩写相同。

（4）参数名不能以下画线_开头。以下划线_开头的参数为系统隐含参数，只能用于 GUI 和宏中。

3. 参数的定义方法

定义参数的方法主要有：直接赋值给参数或从数据库中获取信息。

（1）直接赋值给参数。

在运行过程中，可以用 *SET 命令定义参数。例如：

```
*SET,ABC,-24
*SET,TM,2.07E11
*SET,XORY,ABC
```

也可以用" = "作为一种速记符来调用 *SET 命令（这样更方便），其格式如下。

```
Name = Value
```

这里 Name 是指参数名，Value 是指赋给该参数的数值或字符。例如：

```
ABC = -24
TM =2.07E11
XORY = ABC
```

这与上面的 * SET 是等效的。

注意： 对于字符参数，赋给的值必须被括在单引号中，且不能超过 8 个字符。

在 GUI 中，可以直接在命令输入框或标量参数对话框的 Selection 选项卡（通过 Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters 命令访问）中输入" = "。

（2）从数据库中获取信息。

ANSYS 提供了两种方法来从 ANSYS 中提取数据，下面分别介绍。

① 使用 * GET 命令从某个特定的项目中提取数据并赋给某个特定的参数。

* GET 命令（Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data）从某个特定的项目（一个点、一个单元、一个面等）中提取 ANSYS 提供的数据并赋给某个用户命名的参数。将各种关键词、标识字和数字结合在一起来确定被提取的项目。

* GET 命令的使用格式如下：

```
*GET,Par,Entity,ENTNUM,Item1,IT1NUM,Item2,IT2NUM
```

- Par：将被赋值的参数名。
- Entity：被提取项目的关键词。有效的关键词包括 NODE、ELEM、KP、LINE、AREA、VOLU 等，在 ANSYS Commands Reference（ANSYS 命令参考手册）中的 * GET 部分对此有完整的说明。
- ENTNUM：实体的编号（若为 0，则指全部实体）。
- Item1：某个指定实体的项目名。例如，如果 Entity 是 ELEM，那么 Item1 要么是 NUM（选择集中最大或最小的单元编号），要么是 COUNT（选择集中的单元数目）。在 ANSYS Commands Reference（ANSYS 命令参考手册）中的 * GET 部分对每种实体的 Item1 值有完整的说明。

可以把 * GET 命令看成是对一种树形结构从上至下的路径搜索，即从一般到特殊的确定。

可用下面的例子来说明 * GET 命令的用法。

```
*GET,A,ELEM,5,CENT,X,
```

意为返回单元 5 的质心的 X 坐标值并赋给参数 A。

```
*GET,BCD,ELEM,97,ATTR,MAT        ! BCD = 单元 97 的材料号
```

获得单元 97 的材料属性（MAT 参考号）并赋给单元 BCD。

```
*GET,X1,NODE,1,LOC,X/POST1       ! X1 = 节点 1 的 X 坐标[CSYS]①
*GET,SX25,NODE,25,S,X            ! SX25 = 节点 25 的 X 方向应力[RSYS]②
*GET,UZ44,NODE,44,U,Z            ! UZ44 = 节点 44 的 UZ 方向的位移[RSYS]②
NSORT,S,EQV                      ! 对节点的 VON MISES 应力排序
*GET,SMAX,SORT,,MAX              ! SMAX = 排序的最大值
ETABLE,VOL,VOLU                  ! 用 VOL 存储单元体积
SSUM                             ! 对单元表的列求和
*GET,TOTVOL,SSUM,,VOL            ! TOTVOL = 对 VOL 的列求和
```

提示：

① 表示激活坐标系（CSYS）。

② 表示激活的结果坐标系（RSYS）。

③ 在运行时使用内嵌的获取函数从某个特定的项目中提取特定的数据。

一些数据可以通过函数获取。例如：

```
K,10,KX(1), KY(3)       ! 10 号关键点 X 坐标取 1 号关键点的 X 坐标，Y 坐标取 3 号关键点的 Y
                          坐标
K, 11, KX (1) *2, KY (3)      ! [CSYS]①
F, NODE (2, 2, 0), FX, 100     ! 在节点 (2, 2, 0) 施加力 FX [CSYS]①
```

提示：①表示激活坐标系（CSYS）。

获取函数的参数可以是参数，也可以是其他的获取函数。例如，获取函数 NELEM（ENUM,NPOS）返回在单元 ENUM 上 NPOS 处的节点编号，则联合函数 NX（NELEM（ENUM, NPOS））返回该节点的 X 坐标值。表 7-1 列出了可用的获取函数。

表 7-1 可用的获取函数

获取函数	提取值
NSEL(N)	节点 N 的状态（-1=未被选择，0=未定义，1=被选择）
ESEL(E)	单元 E 的状态（-1=未被选择，0=未定义，1=被选择）
KSEL(K)	关键点 K 的状态（-1=未被选择，0=未定义，1=被选择）
LSEL(L)	线 L 的状态（-1=未被选择，0=未定义，1=被选择）
ASEL(A)	面 A 的状态（-1=未被选择，0=未定义，1=被选择）
VSEL(V)	体 V 的状态（-1=未被选择，0=未定义，1=被选择）
NDNEXT(N)	选择节点编号大于 N 的下一个节点
ELNEXT(E)	选择单元编号大于 E 的下一个单元
KPNEXT(K)	选择关键点编号大于 K 的下一个关键点
LSNEXT(L)	选择线编号大于 L 的下一条线
ARNEXT(A)	选择面编号大于 A 的下一个面
VLNEXT(V)	选择体编号大于 V 的下一个体
CENTRX(E)	单元 E 的质心在全局笛卡儿坐标系中的 X 坐标值
CENTRY(E)	单元 E 的质心在全局笛卡儿坐标系中的 Y 坐标值
CENTRZ(E)	单元 E 的质心在全局笛卡儿坐标系中的 Z 坐标值
NX(N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 X 坐标值
NY(N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 Y 坐标值
NZ(N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 Z 坐标值
KX(K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 X 坐标值
KY(K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 Y 坐标值
KZ(K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 Z 坐标值
LX(L,LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC（0.0to1.0）处的 X 坐标值
LY(L,LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC（0.0to1.0）处的 Y 坐标值

（续）

获取函数	提　取　值
LZ(L,LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC（0.0to1.0）处的 Z 坐标值
NODE(X,Y,Z)	距点 X,Y,Z 最近的被选择的节点的编号（在当前激活坐标系中，符合条件的关键点中编号最小者）
KP(X,Y,Z)	距点 X,Y,Z 最近的被选择的关键点的编号（在当前激活坐标系中，符合条件的关键点中编号最小者）
DISTND(N1,N2)	节点 N1 和节点 N2 之间的距离
DISTKP(K1,K2)	关键点 K1 和关键点 K2 之间的距离
DISTEN(E,N)	单元 E 的质心和节点 N 之间的距离。质心由单元上选择的节点确定
ANGLEN(N1,N2,N3)	两条线之间的夹角（由 3 个节点确定，其中 N1 为顶点）。单位默认为弧度
ANGLEK(K1,K2,K3)	两条线之间的夹角（由 3 个关键点确定，其中 K1 为顶点）。单位默认为弧度
NNEAR(N)	最接近节点 N 的节点
KNEAR(K)	最接近关键点 K 的关键点
ENEARN(N)	最接近节点 N 的单元。单元位置由选择的节点确定
AREAND(N1,N2,N3)	由节点 N1、N2、和 N3 围成的三角形的面积
AREAKP(K1,K2,K3)	由关键点 K1、K2、和 K3 围成的三角形的面积
ARNODE(N)	与节点 N 相连的被选择单元在节点 N 上分配的面积。对于二维平面实体，返回与节点 N 相连边界的面积；对于轴对称实体，返回与节点 N 相连边表面的面积；对于三维实体，返回与节点 N 相连面的面积
NORMNX(N1,N2,N3)	节点 N1、N2、和 N3 确定平面的法线与 X 轴的夹角的余弦值
NORMNY(N1,N2,N3)	节点 N1、N2、和 N3 确定平面的法线与 Y 轴的夹角的余弦值
NORMNZ(N1,N2,N3)	节点 N1、N2、和 N3 确定平面的法线与 Z 轴的夹角的余弦值
NORMKX(K1,K2,K3)	关键点 K1、K2、和 K3 确定平面的法线与 X 轴的夹角的余弦值
NORMKY(K1,K2,K3)	关键点 K1、K2、和 K3 确定平面的法线与 Y 轴的夹角的余弦值
NORMKZ(K1,K2,K3)	关键点 K1、K2、和 K3 确定平面的法线与 Z 轴的夹角的余弦值
ENEXTN(N,LOC)	与节点 N 相连的单元。若有很多单元与节点 N 相连，则由 LOC 定位。列表结束时返回零
NELEM(E,NPOS)	单元 E 中在 NPOS（1～20）位置上的节点号
ELADJ(E,FACE)	与单元 E 的某个表面号（FACE）邻近的单元。面号与面荷载关键号相同。仅仅考虑那些有相同维数和形状的单元。若邻近的单元多于 1 个，则返回 -1；若无邻近单元，返回 0
NDFACE(E,FACE,LOC)	单元 E 的某个表面（FACE）上的 LOC 处的节点。面号与面荷载关键号相同。LOC 指表面上的节点位置（对于 IJLK 表面，LOC=1 指节点 I，LOC=2 指节点 J 等）
NMFACE(E)	包含选定节点的单元 E 的表面号。面号输出就是面荷载关键号。如果一个面上出现多个荷载关键号（如线单元和面单元），该面上的最小荷载关键号将被输出
ARFACE(E)	对于二维平面实体和三维实体，返回包含选定节点的单元 E 的表面面积。对于轴对称单元，返回总表面积（360°）
UX(N)	节点 N 在 X 向的结构位移
UY(N)	节点 N 在 Y 向的结构位移
UZ(N)	节点 N 在 Z 向的结构位移
ROTX(N)	节点 N 绕 X 向的结构转角
ROTY(N)	节点 N 绕 Y 向的结构转角

（续）

获取函数	提　取　值
ROTZ(N)	节点 N 绕 Z 向的结构转角
TEMP(N)	节点 N 上的温度
PRES(N)	节点 N 上的压力
VX(N)	节点 N 在 X 向的流动速度
VY(N)	节点 N 在 Y 向的流动速度
VZ(N)	节点 N 在 Z 向的流动速度
ENKE(N)	在节点 N 上的湍流动能（FLOTRAN）
ENDS(N)	在节点 N 上的湍流能量耗散（FLOTRAN）
VOLT(N)	节点 N 处的电压
MAG(N)	在节点 N 上的磁标势
AX(N)	在节点 N 上的 X 向磁矢势
AY(N)	在节点 N 上的 Y 向磁矢势
AZ(N)	在节点 N 上的 Z 向磁矢势

4. 数组参数

标量参数只能存储一个参数值，而数组参数代表着一组值。ANSYS 中的数组参数是能定义成矩阵形式的多维数组。数组参数中的项可以是用户定义的值，也可以是 ANSYS 计算出的值。用户定义的数组可以在 ANSYS 程序中直接输入，也可以从已有的数据文件中读入。

数组参数分为 3 种类型：第 1 类是数值型数组参数（也称一般数组参数，ARRAY Parameter）由简单整理成表格形式的离散数据组成；第 2 类就是通常所说的表数组参数（TABLE Array Parameter），也是由整理成表格形式的数据组成，但这种表允许在两个指定的表格项间进行线性插值，还可以用非整数数值作为行和列的下标；第 3 类是字符型数组参数（HAR Array Parameter），由字母或数字组成。

数组参数具有矩阵和向量运算能力，可以简化数据输入/输出。在 ANSYS 运行中，任何时刻数组参数（以及其他参数）都能以 FORTRAN 实数的形式写入文件，写出的文件可用于 ANSYS 其他应用。

（1）数组参数的定义介绍如下。

定义数组参数有两种途径，利用 * DIM 命令或者通过 GUI 菜单路径来定义。

① * DIM 命令格式如下。

```
*DIM,Par,Type,IMAX,JMAX,KMAX,Var1,Var2,Var3
```

其中，Par 是数组名；Type 是数组类型，标识字有 ARRAY（默认值）、CHAR、TABLE、STRING；IMAX、JMAX、KMAX 分别是数组下标（I、J、K）的最大值；Var1、Var2、Var3 是定义表数组参数时对应的行、列、面的变量名。

例如：

```
*DIM,A1,,6
*DIM,A2,ARRAY,3,3
*DIM,A3,,4,5,6
```

② 通过 GUI 菜单路径定义数组参数的方法如下：在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit 命令，弹出 Array Parameters（数组参数）对话框，如图 7-2 所示。单击 Add 按钮，弹出 Add New Array Parameter（添加新数组参数）对话框，如图 7-3 所示。按照说明添加参数，然后单击 OK 按钮确认，或者单击 Apply 按钮继续添加。

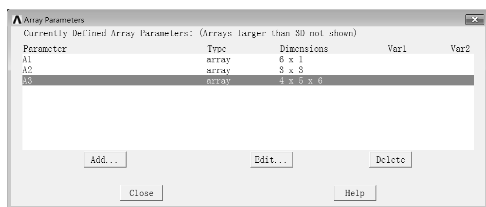


图 7-2　Array Parameters（数组参数）对话框

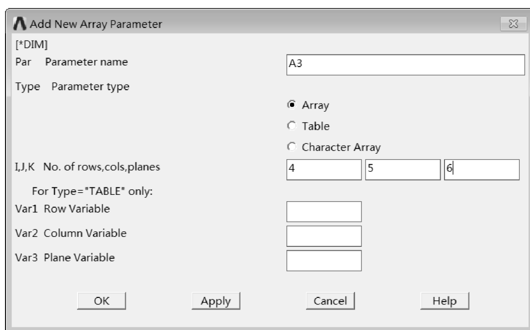


图 7-3　Add New Array Parameter（添加新数组参数）对话框

（2）数组参数的赋值介绍如下。

① 使用 *SET 命令或 “ = ” 赋值。例如：

```
A(1,1) =11
A(2,1) =12
```

对于字符型数组，不能以图形方式填充字符串。直接按上述步骤操作会弹出图 7-4 所示警告信息。可使用 “ = ” 输入值，接着用 *STAT 显示字符串；每个字符串必须用单引号括起来。

例如：

```
*DIM,A,char,2,1,1
A(1) ≐ UX ', UY
*STAT,A
```

得到如图 7-5 所示数组信息。

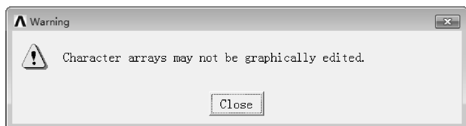


图 7-4　警告信息

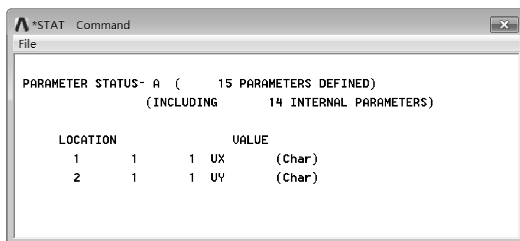


图 7-5　字符型数组信息

对于表数组，必须定义第 0 个位置，否则取默认值 7.889E -31，如图 7-6 所示。

例如：

```
FORCE(1,1) =0,560,560,238.5,0
```

```
FORCE(1,0) =1E -6,0.8,7.2,8.5,9.3
FORCE(0,1) =0
```

赋值后如图 7-7 所示。

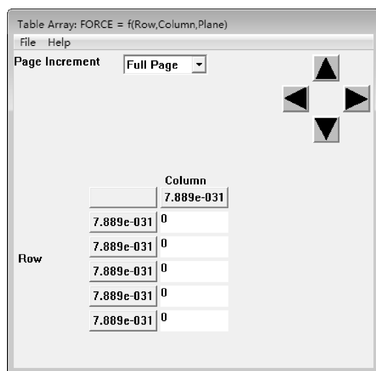


图 7-6　默认状态

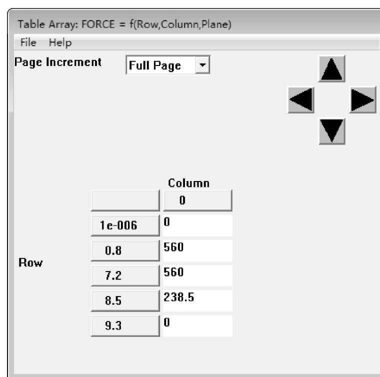


图 7-7　赋值后

② 使用 ＊VFILL 命令或 GUI 界面中的 Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Fill 预定义函数（阶跃函数、随机函数等）也可以赋值。

③ 从一个文件读入数据也可以给参数赋值。

读取数据的命令中，＊VREAD 用于数值数组、＊TREAD 用于数据表。在 GUI 界面中对应的路径为 Utility Menu > Parameters > Read from File。

④ 从数据库也可以获取参数值。正如 ＊GET 从数据库获取标量数据，可以用 ＊VGET 获取数组信息（或在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Parameters > Get Array Data 命令进行操作）。先定义数组，然后获取数据。

例如：

```
*dim,dispval,array,20,3              ! 定义 20×3 array
*vget,dispval(1,1),node,1,u,x        ! 从点 1 开始将点 1 -20 的 UX 值赋予第一列
*vget,dispval(1,2),node,1,u,y        ! 从点 1 开始将点 1 -20 的 UY 值赋予第二列
*vget,dispval(1,3),node,1,u,z        ! 从点 1 开始将点 1 -20 的 UZ 值赋予第三列
```

（3）对数组参数的运算

一旦定义了数组参数，就可以对它们进行各种运算，如图 7-8 所示。

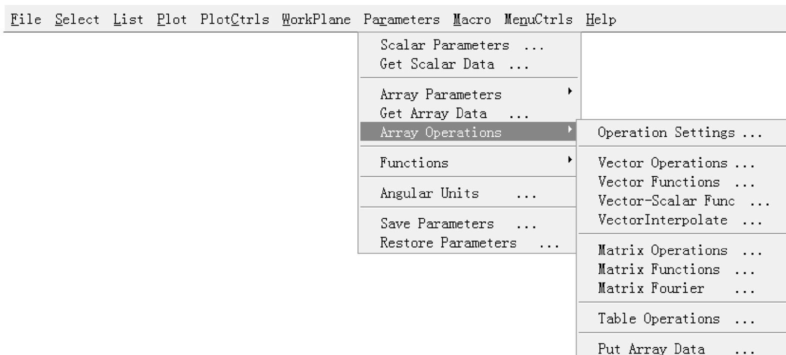


图 7-8　数组参数的运算

路径：

- GUI：Utility Menu > Parameters > Array Operations。
- 使用 * VFUN、 * VOPER、 * VSCFUN、 * VWRITE 等命令。

1）对向量的运算。

对向量的运算就是按某种顺序对数组元素进行一系列的诸如加、减、求正弦、求余弦、点积、叉乘等运算。

向量运算命令包括 * VOPER、 * VFUN、 * VSCFUN、 * VITRP、 * VFILL、 * VREAD 和 * VGET。

注意：在这些命令中，只有 * VREAD 和 * VWRITE 对字符型数组参数有效，其余的只能用于 ARRAY 类型或 TABLE 类型（由 * DIM 定义）的数组参数。

① * VOPER（或 Utility Menu > Parameters > Array Operations > Vector Operations）：对两个输入数组向量进行运算，输出一个数组向量。

例如：* voper,c(1),a(1),sub,b(1)，等价于 c(k) = a(k) - b(k)。

其他操作包括：加、减、乘、除；最小值，最大值，逻辑运算；微分，积分；点积和叉积。

② * VFUN（或 Utility Menu > Parameters > Array Operations > Vector Functions）：对两个输入数组向量执行某函数，输出一个数组向量。

例如：* VFUN 对单个数组操作， * vfun,b(1),sin,a(1)等价于 b(j) = sin(a(j))。

其他操作包括：自然对数，常用对数，指数；平方根，排序，复制；局部坐标系与全局坐标系的相互转换关系，路径的切线和法线矢量等。

③ * VSCFUN（或 Utility Menu > Parameters > Array Operations > Vector - Scalar Func）：确定单个输入数组矢量属性，并将结果存放到指定的标量参数中。

例如：* vscfun,maxval,max,a(1)，等价于一个标量 maxval = max(a(i))。

其他操作包括：求数组的所有元素的和；诸如标准偏差，中值，平均数等统计量；最小值/最大值，最小值/最大值的位置；第一个和最后一个非零记录的位置。

④ * VWRITE：将数据按格式写进文件。

例如：

```
*CFOPEN,WING,DAT
*VWRITE
(/,3X,'NODE NUMBER',4X,'TEMPERATURE',/)
*VWRITE,NNUM(1),TVAL(1)
(5X,F6.0,6X,E14.8)
*CFCLOSE
```

将会创建一个名为 wing.dat 的文件，包含指定格式的 nnum 和 tval 数组。

⑤ * VITRP（或 Utility Menu > Parameters > Array Operations > Vector Interpolate）：通过在指定的表下标位置插入一个数组参数（TABLE 类型）来生成一个数组参数（ARRAY 类型）。

2）对矩阵的运算

矩阵运算是一种数值型数组参数之间的数学运算，如矩阵乘法、计算转置矩阵、求解联立方程组等。

下面分别介绍矩阵的运算命令。

① * MOPER（或 Utility Menu > Parameters > Array Operations > Matrix Operations）：对两个输入数组参数矩阵进行矩阵运算，输出一个数组参数矩阵。

矩阵运算包括：矩阵相乘、求解联立方程组、对矩阵中的某个指定向量排序（按上升顺序）、计算两个向量之间的协方差、计算两个向量之间的相关性。

② *MFUN（或 Utility Menu > Parameters > Array Operations > Matrix Functions）：复制或转置一个数组参数矩阵（接收一个输入矩阵，生成一个输出矩阵）。

③ *MFOURI（或 Utility Menu > Parameters > Array Operations > Matrix Fourier）：计算傅里叶级数的系数或求傅里叶级数。

关于这些命令的详细介绍，参见 ANSYS 命令参考手册（ANSYS Commands Reference）。初学 APDL 时可能对为数众多的命令难以记忆，此时应充分利用 ANSYS 的帮助（Product Help）。

所有向量和矩阵运算命令都会受到下面这些命令的影响：*VCUM、*VABS、*VFACT、*VLEN、*VCOL 和 *VMASK。在上述命令中，只有 *VLEN、*VMASK 与 *VREAD 或 *VWRITE 连用时，对字符型数组参数有效。可以通过 *VSTAT 命令来查看这些命令的状态。

除 *VSTAT 命令之外，下面将要介绍的其他所有的命令都可以通过 Utility Menu > Parameters > Array Operations > Operation Settings 得到。

下面列出有效的数组规定命令。

- *VCUM：指定结果累积或不累积（覆盖已有结果）。ParR 为向量运算的结果，要么被加入一个已存在的同名参数中，要么被覆盖。默认为不累积结果，即 ParR 覆盖掉已存在的同名参数。
- *VABS：使向量运算中的某个或所有参数取绝对值。默认为实数值。
- *VFACT：对向量运算中的某个或所有参数乘以一个比例因子。比例因子默认为 1.0。
- *VCOL：指定矩阵运算中列的数目。默认为从指定起始处填满结果数组的所有位置。
- *VSTAT：列出数组参数的当前状态。
- *VLEN（或 Utility Menu > Parameters > Array Operations > Operation Settings）：指定数组参数运算中被用到的行的数目。
- *VMASK（或 Utility Menu > Parameters > Array Operations > Operation Settings）：指定某个数组作为屏蔽向量。

这些规定命令将对向量和矩阵运算命令产生影响，其影响关系见表 7-2。

表 7-2 规定命令对运算的影响

	*VABS	*VFACT	*VCUM	*VCOL	*VLEN		*VMASK
					NROW	NINC	
*MFOURI	No	No	No	N/A	No	No	No
*MFUN	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
*MOPER	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
*VFILL	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VFUN	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VGET	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VITRP	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VOPER	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VPLOT	No	No	N/A	N/A	Yes	Yes	Yes
*VPUT	Yes	Yes	No	N/A	Yes	Yes	Yes

(续)

	* VABS	* VFACT	* VCUM	* VCOL	* VLEN		* VMASK
					NROW	NINC	
* VREAD	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
* VSCFUN	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
* VWRITE	No	No	N/A	N/A	Yes	Yes	Yes

7.1.3 APDL 语言的流程控制

ANSYS 在执行以 APDL 语言编写的程序时，采取的是逐行解释并执行命令的方式。复杂的程序经常需要控制命令的执行顺序。为此，APDL 提供了以下流程控制命令，一种接近于 FORTRAN 的流程控制命令。

1. 分支结构

APDL 允许根据条件执行某些供选择的程序体中的一个。条件的值通过比较两个数的值（或等于某数值的参数）来确定。

* IF 命令的语法格式如下。

```
*IF,x,OPER,y,THEN
```

其中，x 和 y 可以是数字、参数或参数表达式；Oper 是比较运算符。

APDL 提供了 8 个比较运算符，简要介绍如下。

```
x,EQ,y          ! x = y
x,NE,y          ! x≠y
x,LT,y          ! x < y
x,GT,y          ! x > y
x,LE,y          ! x≤y
x,GE,y          ! x≥y
x,ABLT,y        ! |x| < |y|
x,ABGT,y        ! |x| > |y|
```

若比较的值为真，则执行 then 指定的操作。之后的操作可能是：

- * EXIT，退出 DO 循环。
- * CYCLE，跳到 DO 循环末端。

这些操作符只有当条件为真时才起作用，否则 ANSYS 将会移至 * ELSEIF(若提供)、* ELSE(若提供)或 * ENDIF。

在最简单的形式中，* IF 命令判断比较的值，若为真，则转向 Base 变量所指定的标识符处。结合一些 * IF 命令，将能得到和其他编程语言中 CASE 语句相同的功能。注意，不要转向某个位于 if－then－else 结构或 do 循环中的带标识符的行。

通过给 THEN 变量赋值 STOP，可以离开 ANSYS。

if－then－else 结构仅仅判断条件并执行接下来的程序体或跳到 * ENDIF 命令的下一条语句处（用 Continue 注释表示）。

```
*IF,A,EQ,1,THEN
! Block1
```

```
*ENDIF
! Continue
```

2. 循环结构

*REPEAT 命令是最简单的循环命令，通过它可以直接按指定的次数执行上一条命令，并按常数增加命令所带参数。例如：

```
E,1,2
*REPEAT,5,0,1
```

E 命令在节点 1 和 2 之间生成一个单元，*REPEAT 命令指示执行 E 命令 5 次（包括最初的一次），每执行一次第 2 个节点号加 1。结果共生成 5 个单元：1－2、1－3、1－4、1－5 和 1－6。

注意：大多数以斜线（/）或星号（*）开头的命令，以及扩展名不是 .mac 的宏，都不可以重复调用。但是，以斜线（/）开头的图形命令可以重复调用。同时，要避免对交互式命令使用 *REPEAT 命令，诸如那些需要拾取或需要用户响应的命令。

DO 循环允许执行一个命令块数次。

实际上，在 DO 循环中对其中包含什么内容没有限制。在条件允许的情况下，可以包含任何 ANSYS 命令，包括前处理、求解和后处理。

*DO 开始循环，*ENDDO 结束循环。

提示：可以用 *EXIT(退出循环)和 *CYCLE(跳到 DO 循环末)控制循环。*EXIT 和 *CYCLE 也可以根据 if－test 的结果来执行。

在构造 DO 循环时，要遵循以下原则。

- 不要通过在 *IF 或 *GO 命令中带有：Label 来从 DO 循环结构中跳出。
- 不要在 DO 循环结构中用：Label 来跳到另外一行语句。可以用 if－then－else－end if 结构来代替。

在 DO 循环结构中，第一次循环后，自动禁止命令结果输出。如果想得到所有循环的结果输出，可在 DO 循环结构中使用/GOPR 或/GO（无响应行）命令。

常用的流程控制命令列于表 7-3 中，以供读者参考，更为详细的介绍参见 ANSYS 的帮助文件。

表 7-3 常用的流程控制命令

APDL 命令	作　　用	用 法 提 示
*DO	定义循环开始。紧接在 *DO 之后的命令（在 *ENDDO 之前）反复执行，直到满足循环控制条件	命令格式为 *DO，Par，IVAL，FVAL，INC。其中： ● Par 是用作循环指标的标量参数 ● IVAL 和 FVAL 是参数 Par 的初始和最终的值 ● INC 为每循环一次，IVAL 的增量 可以通过 *IF 命令来控制循环。 ANSYS 允许最多嵌套 20 层的 DO 循环，但是包含/INPUT、*USE、或“未知命令”宏的 DO 循环支持的嵌套层数要少一些，这是因为这些命令会进行内部的文件转换。在 DO 循环中不要包含拾取操作 在 do－loop 结构中使用/CLEAR 命令时要特别小心。/CLEAR 命令不会清除 do－loop 堆栈，但是它会删除所有的参数，包括本身 *DO 语句中的循环参数。为避免由此引发的循环值未定义的问题，可以在/CLEAR 命令前运行/PARSAV 命令，然后接着/CLEAR 命令运行/PARRES 命令

（续）

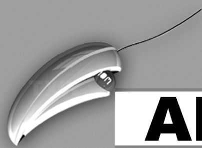
APDL 命令	作 用	用 法 提 示
* ENDDO	结束一个 DO 循环，并开始下一个循环	对每一个嵌套的 DO 循环都要有一个 * ENDDO 命令。一个循环的 * ENDDO 和 * DO 命令必须在同一文件中
* CYCLE	执行 DO 循环时，ANSYS 程序绕过所有在 * CYCLE 和 * END-DO 之间的命令，然后开始下一个循环	可以有条件地使用 cycle 选项（通过 * IF 命令） * CYCLE 命令必须和 * DO 命令处于同一文件中，并且在 * ENDDO 命令之前
* EXIT	跳出 DO 循环	该命令执行紧接在 * ENDDO 命令之后的下一行。一个循环的 * EXIT 和 * DO 命令必须在同一文件中。可以有条件地使用 exit 选项（通过 * IF 命令）
* IF	按条件执行命令	命令格式为：* IF，VAL1，Oper，Val2，Base。其中： ● VAL1 是比较的第 1 个数值（或数字参数） ● Oper 是比较运算符，包括 EQ（等于）、NE（不等于）、LT（小于）、GT（大于）、LE（小于或等于）、GE（大于或等于）、ABLT（绝对值小于）、ABGT（绝对值大于） ● VAL2 是比较的第 2 个数值（或数字参数）。若比较的结果为真，则执行 Base；若为假，则执行下一条语句 Base 可能为： ■ ：label（跳到以标识字 label 开头的语句处） ■ STOP（跳出 ANSYS 程序） ■ EXIT（跳出当前的 DO 循环） ■ CYCLE（跳到当前 DO 循环的结束处） ■ THEN（构造 if - then - else 结构） * IF 程序体最多可嵌套 10 层。不能在 DO 循环或 if - then - else 结构中跳到某个：label 行。可以在 if - then - else 结构中执行/CLEAR 命令。/CLEAR 命令不会清除 * IF 堆栈，* IF 层的号码仍然保留。必须用 * ENDIF 来结束逻辑分支。同时，要记住/CLEAR 命令会删除所有的参数，包括在分支命令中使用的任何参数。为避免由于删除参数而引发问题，可以在/CLEAR 命令前运行/PARSAV 命令，然后接着/CLEAR 命令运行/PARRES 命令
* ENDIF	终止 if - then - else 结构	* IF 和 * ENDIF 命令必须处于同一文件中
* ELSE	在 if - then - else 结构中生成最后一个可选择的程序体	* ELSE 和 * ENDIF 命令必须处于同一文件中
* ELSEIF	在 if - then - else 结构中生成一个可选择的中间程序体	命令格式为 * ELSEIF，VAL1，Oper，VAL2。其中： ● VAL1 是比较的第 1 个数值（或数字参数） ● Oper 是比较运算符，包括 EQ（等于）、NE（不等于）、LT（小于）、GT（大于）、LE（小于或等于）、GE（大于或等于）、ABLT（绝对值小于）、ABGT（绝对值大于） ● VAL2 是比较的第 2 个数值（或数字参数）；如果 Oper = EQ 或 NE，VAL1 和 VAL2 可以是字符串（括在单引号中）或参数 * IF 和 * ELSEIF 命令必须处于同一文件中

7.1.4 宏文件

宏文件可视为用户自行定义的一段程序，包括一系列 ANSYS 命令流，扩展名一般为 . mac。宏文件常用于记录一系列复杂的或常用的命令流，可以将其文件名作为自定义的命令使用，但应该注意不能与已有的 ANSYS 命令重复，否则将被忽略并指行原有内部命令。

1. 创建宏文件

创建宏文件一般有两种方法，即使用命令或通过 GUI 菜单。



通过 GUI 菜单路径创建宏文件的方法如下。

在 GUI 界面中选择 Utility menu > Macro > Create Macro 命令，弹出图 7-9 所示的 Create Macro 对话框。在 Macro file name 框中输入宏文件的文件名，在下面的 Enter Commands to be included in macro 框中输入文件内容，单击 OK 按钮，就可以在当前工作目录下找到刚才所定义的宏文件。

在工作目录下找到 macro1. mac，用“记事本”打开，即可看到刚生成的宏文件，如图 7-10 所示。

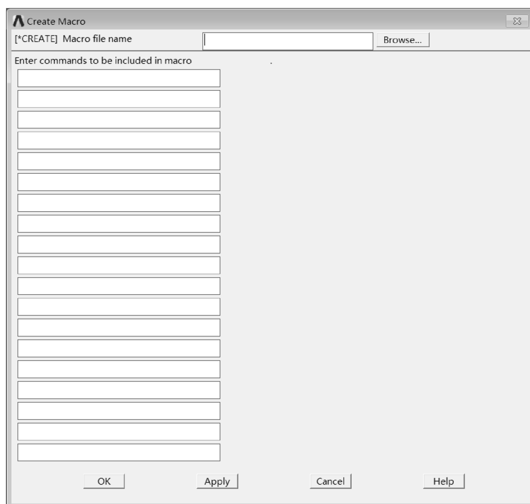


图 7-9　Create Macro 对话框

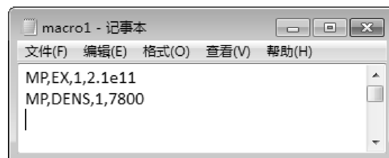


图 7-10　宏文件 macro1

常用的创建宏文件命令有 * CREATE、 * CFOPEN、 * CFWRITE、 * CFCLOS、/TEE，下面分别介绍。

* CREATE 命令格式如下。

```
* CREATE,Fname,Ext,--
```

其中，Fname 是宏文件名与路径，当不指定路径时默认为当前工作目录；Ext 是文件扩展名；--无需定义。

* CFOPEN 命令格式如下。

```
* CFOPEN,Fname,Ext,--,Loc
```

其中，Fname、Ext 的含义与 * CREATE 命令中的相应项相同；Loc 用于决定是覆盖同名文件还是添加内容，Loc 为空时将覆盖同名文件，Loc = APPEND 时向同名文件添加内容。

* CFWRITE 命令格式如下。

```
* CFWRITE,Command
```

* CFWRITE 需要与 * CFOPEN 命令配合使用。例如，在命令输入窗口中输入如下命令。

```
* CFOPEN,macro1,mac
* CFWRITE,X001 = 10
* CFWRITE,Y001 = 8
```

```
*CFWRITE,X001 =12
*CFCLOS
```

则生成的宏文件如图 7-11 所示。

需要注意的是，*CFWRITE 命令只能与 *CFOPEN 命令配合使用，如单独使用则会弹出图 7-12 所示错误提示。

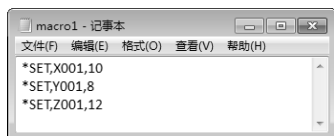


图 7-11　由 *CFWRITE 命令编辑的宏文件

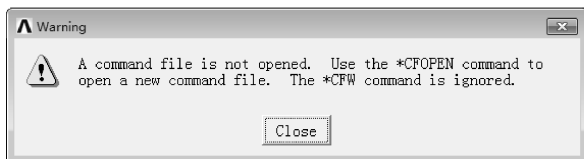


图 7-12　单独使用 *CFWRITE 命令弹出的警告

/TEE 命令格式如下。

```
/TEE,Label,Fname,Ext,--
```

其中，Fname、Ext、-- 的含义与上述命令中的相应项相同；Label 是/TEE 命令的操作标识符，当 Label = NEW 时，创建一个新的宏文件，如有同名则覆盖，当 Label = APPEND 的则向同名文件添加内容，当 Label = END 时则关闭刚才打开的文件。

2. 调用宏文件

宏文件可以互相嵌套调用，但最多不得超过 20 层。在宏命令中，可由 *ASK 命令根据用户说明信息提示参数。在宏文件内部使用 *MSG 命令允许将参数和用户提供的信息写入用户可控制的、有输出的文件，这些信息可以是一个简单注释、警告、错误信息等，甚至可以是一个致命的错误信息，这就允许 ANSYS 在内部创建报告或生成可用外部程序读取的输出文件。

ANSYS 程序提供了一些预先编写好的宏文件，它们位于…\ansys_inc\v140\ANSYS\apdl 文件夹内，用户可以直接调用这些宏文件。

在 ANSYS 中调用宏有如下 3 种方式。

```
*USE,macroname
macroname
/INPUT,'macroname',,,,0
```

用户在为自己编写的宏文件命名之前，可先在命令输入框中输入要创建的宏文件的文件名并按 Enter 键，如弹出的图 7-13 所示的 Error 对话框，则说明当前没有与用户所选用的文件名重复的宏文件，该名称可以使用。

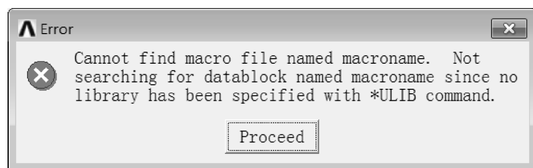


图 7-13　Error 对话框

7.1.5 函数、运算符以及常用控制命令

1. 函数与运算符

APDL 为用户提供了基本的数学运算符，见表 7-4。

表 7-4 数学运算符

运 算 符	操 作	运 算 符	操 作
+	加	**	乘方
-	减	>	大于
*	乘	<	小于
/	除		

APDL 提供的数学运算符的优先级与 FORTRAN 相同，有编程经验的用户可以方便地使用。

表 7-5 列出了一些 ANSYS 中的常用函数，方便用户参考。

表 7-5 ANSYS 常用函数

函数名称	简 介
SIN(x)	返回 x 的正弦值，x 的默认单位为弧度，可用 *AFUN 指定为角度
COS(x)	返回 x 的余弦值，x 的默认单位为弧度，可用 *AFUN 指定为角度
TAN(x)	返回 x 的正切值，x 的默认单位为弧度，可用 *AFUN 指定为角度
SINH(x)	返回 x 的双曲正弦值，x 的默认单位为弧度，可用 *AFUN 指定为角度
COSH(x)	返回 x 的双曲余弦值，x 的默认单位为弧度，可用 *AFUN 指定为角度
TANH(x)	返回 x 的双曲正切值，x 的默认单位为弧度，可用 *AFUN 指定为角度
ASIN(x)	返回 x 的反正弦值，$-1.0<x<1.0$，返回值默认单位为弧度，可用 *AFUN 指定为角度
ACOS(x)	返回 x 的反余弦值，$-1.0<x<1.0$，返回值默认单位为弧度，可用 *AFUN 指定为角度
ATAN(x)	返回 x 的反正切值，$-1.0<x<1.0$，返回值默认单位为弧度，可用 *AFUN 指定为角度
ATAN2(y,x)	返回 y/x 的反正切值，返回值默认单位为弧度，可用 *AFUN 指定为角度
LOG(x)	返回 lnx
LOG10(x)	返回 $\log_{10}x$，即 lgx
SQRT(x)	返回 x 的平方根
NINT(x)	返回最接近 x 的取整
MOD(x,y)	返回 x/y 的余数，当 y=0 时返回 0
RAND(x,y)	产生以 x 为下界、y 为上界的随机数
GDIS(x,y)	产生以 x 为均值、y 为方差的正态分布的随机数
ABS(x)	返回 x 的绝对值
SIGN(x,y)	x 绝对值不变，符号修改为与 y 同号，当 y=0 时取正
EXP(x)	返回 e^x
VALCHR(CPARM)	返回 CPARM 的数字值，如果 CPARM 不是数字则返回 0.0
CHRVAL(PARM)	返回数字参数 PARM 的字符值
UPCASE(CPARM)	将 CPARM 置为大写字符串
LWCASE(CPARM)	将 CPARM 置为小写字符串

选择 Utility Menu > Parameters > Functions > Define/Edit 命令，弹出图 7-14 所示 Function Editor 对话框。

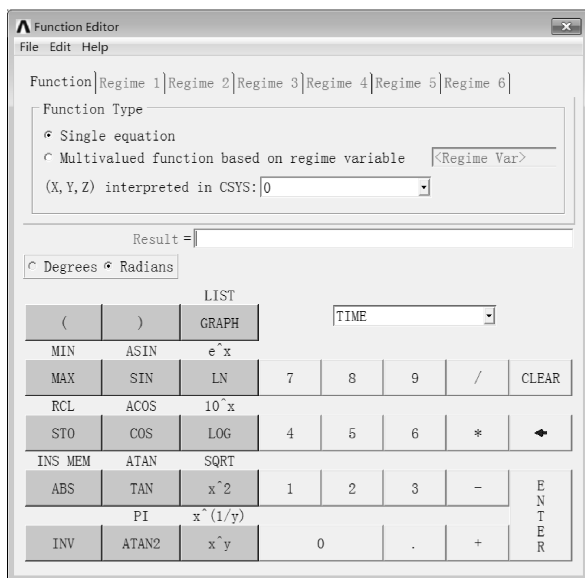


图 7-14 Function Editor（函数编辑器）对话框

在该对话框中，可以定义方程与控制条件。可以建立单个方程或一个函数，函数可以由一系列方程联立而成，每个方程对应特定的状态控制区间，最终作为边界条件，对分析模型产生重大影响。

2. 常用控制命令

前文的介绍中或多或少对一些命令已经有所涉及，今后的实例介绍还将大量地涉及命令，为方便读者查阅，同时保证下文讲述的连贯性，在此对一些常用命令进行介绍。

（1）基本应用与建模命令介绍如下。

```
FIHI(FINISH)
```

退出处理器。

```
/CLEAR
```

清空所有数据。

以上两条命令常同时出现于命令流文件的开头，用于清空数据，防止意外残留的其他工作信息的干扰。

```
/PREP7
```

进入前处理器。

```
K,NPT,X,Y,Z
```

命令 K 用于在工作区指定坐标位置，创建关键点。

- NPT：关键点编号。默认为将新创建的关键点编号设置为当前最大编号值加 1。

- X，Y，Z：关键点坐标，默认为0。

```
L,P1,P2,NDIV,SPACE,XV1,YV1,ZV1,XV2,YV2,ZV2
```

命令L用于连接工作区内的两个关键点，创建一条线。可以为直线或曲线。

- XV1，YV1，ZV1，XV2，YV2，ZV2：分别是两个关键点处在X、Y、Z方向上的切线斜率。全为0时，L命令创建的是直线。
- P1，P2：被连接的两个关键点编号。当P1＝P时，激活GUI中的拾取功能，其后的项目均被略去。

```
A,P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10,P11,P12,P13,P14,P15,P16,P17,P18
```

命令A用于连接数个关键点，创建一个面。可由至少3个、至多18个点连接围成面。

```
CYL4,XCENTER,YCENTER,RAD1,THETA1,RAD2,THETA2,DEPTH
```

命令CYL4用于创建一个圆柱。

- XCENTER、YCENTER：指定圆心坐标。
- RAD1、RAD2：两个圆端面的半径。通过设置不同的半径值，也可以创建圆台、圆锥。

```
BLC4,XCORNER,YCORNER,WIDTH,HEIGHT,DEPTH
```

命令BLC4用于创建一个长方体，通过一个顶点的坐标（XY面内）、XY面内的长度、宽度及Z方向上的深度控制其形状与位置。

ANSYS中有这样一类命令，它们比较类似，作用效果相同，但作用于不同对象。例如ASEL与VSEL，前者用于面的选择，后者用于体的选择，两者用法与参数类似。对于这一类命令，在此将其归类统一说明，见表7-6和表7-7。

表7-6 对象名称

名称	关键点	线	面	体	节点	单元
符号（X）	K	L	A	V	N	E

表7-7 常用命令

命令	用途	命令	用途
XSEL	选择对象	XCLEAR	清除对象
XMESH	划分网格	XADD	布尔运算加
XDELE	删除对象	XSUB	布尔运算减
XPLOT	在工作区中显示对象	XGLUE	布尔运算合并
XLIST	列出对象	XSUM	计算对象几何信息
XGEN	复制对象		

（2）网格划分命令介绍如下。

```
ET,ITYPE,Ename,KOP1,KOP2,KOP3,KOP4,KOP5,KOP6,INOPR
```

定义单元类型。

- ITYPE：用户自行定义的单元类型编号。
- Ename：单元号，如 LINK180、BEAM188 等。
- KOP1 ~ KOP6：单元描述选项。



```
R,NSET,R1,R2,R3,R4,R5,R6
```

定义实常数。

- NSET：实常数组号。
- R1 ~ R6：实常数参数值。

```
MP,Lab,MAT,C0,C1,C2,C3,C4
```

定义材料属性。

- Lab：材料性能标识，可以取如下值。
  - EX：弹性模量。
  - ALPX：线膨胀系数。
  - CTEX：瞬间线膨胀系数。
  - THSX：热应变。
  - REFT：参考温度。
  - PRXY：主泊松比。
  - NUXY：次泊松比。
  - GXY：剪切模量。
  - DAMP：阻尼比。
  - DMPR：均质材料阻尼系数。
  - MU：摩擦系数。
  - DENS：密度。
  - C：比热容。
  - ENTH：热焓。
  - QRATE：热生成率。
  - HF：对流或散热系数。
  - KXX：热传导率。
- MAT：材料组号，由用户定义。
- C0 ~ C4：分别为材料属性值的零次项（常数项）、一次项、二次项、三次项和四次项。

```
ESIZE,SIZE,NDIV
```

定义单元尺寸。

- SIZE：模型中最大的单元边长。
- NDIV：每条线被分成的份数。

以上两个参数只需指定其一。

```
AESIZE,ANUM,SIZE
```

面单元尺寸控制。

- ANUM：需要进行控制的面的编号。
- SIZE：单元尺寸值。

```
LESIZE,NL1,SIZE,ANGSIZ,NDIV,SPACE,KFORC,LAYER1,LAYER2,KYNDIV
```

- NL1：需要进行控制的线的编号。
- SIZE、NDIV：指定分割的尺寸或份数，两者只定义其一。
- ANGSIZ：将曲线按角度分割，仅在 SIZE 与 NDIV 为空时有效。
- SPACE：分段的间隔比率。
- KFORC：取值为 0 时表示仅设置未定义的线；为 1 时表示设置所有选定线；为 2 时表示仅改设置份数少的；为 3 时表示仅改设置份数多的。
- LAYER1：层 1（多层划分时）。
- LAYER2：层 2（多层划分时）。
- KYNDN：设置为 0，No，off 时表示不可改变指定尺寸；设置为 1，yes，on 时表示可改变指定尺寸。

```
KESIZE,NPT,SIZE,FACT1,FACT2
```

- NPT：关键点编号。
- SIZE：设置划分尺寸。

```
DESIZE,MINL,MINH,MXEL,ANGL,ANGH,EDGMN,EDGMX,ADJF,ADJM
```

- MINL：当使用低阶单元时每条线上的最小单元数，默认为 3。
- MINH：当使用高阶单元时每条线上的最小单元数，默认为 2。
- ANGL：曲线上低阶单元的最大跨角，默认为 15°。
- ANGH：曲线上高阶单元的最大跨角，默认为 28°。
- EDGMN：最小的单元边长，默认不设置。
- EDGMX：最大的单元边长，默认不设置。
- ADJF：仅在自由网格划分时，相近线的预定纵横比。对 h 单元默认为 1（等边长），对 p 单元默认为 4。
- ADJM：仅在映射网格划分时，相近线的预定纵横比。对 h 单元默认为 4（矩形），对 p 单元默认为 6。

```
SMRTSIZE,SIZLVL,FAC,EXPND,TRANS,ANGL,ANGH,GRATIO,SMHLC,SMANC,MXITR,SPRX
```

- SIZLVL：网格划分时的总体单元尺寸等级，其值控制网格的疏密程度。可取如下值。
  - N：智能单元尺寸等级，其值在 1 ~ 10 之间，此时其他参数无效。
  - STAT：列表输出 SMRTSIZE 设置状态。
  - DEFA：恢复默认的 SMRTSIZE 设置。
  - OFF：关闭智能网格划分。
- FAC：用于计算默认网格尺寸缩放因子，默认设置为 1。
- EXPND：网格扩展或收缩系数。
- TRANS：网格过渡系数。

- ANGL：曲线上低阶单元的最大跨角，默认为22.5°。
- ANGH：曲线上高阶单元的最大跨角，默认为30°。
- GRATIO：相邻性检查的允许增长率，取值范围为1.2～5.0。
- SMHLC：小孔的粗糙控制参数。
- SMANC：小角度的粗糙控制参数。
- MXITR：尺寸迭代的最大次数，默认为4。
- SPRX：相邻面细化控制参数。

```
VCLEAR,NV1,NV2,NINC
```

清除网格。

- NV1、NV2：将NV1～NV2的所有体作为清除对象。
- NINC：体编号的增量。

```
ACLEAR,NA1,NA2,NINC
```

- NV1、NV2：将NV1～NV2的所有体作为清除对象。
- NINC：面编号的增量。

（3）加载与求解命令介绍如下。

```
D,NODE,Lab,VALUE,VALUE2,NEND,NINC,Lab2,Lab3,Lab4,Lab5,Lab6
```

命令D用于为选中节点施加自由度约束。

- NODE：将施加约束的节点号，可以使用ALL或组件名。
- Lab：自由度标识符，如ROTX、UX等。如使用ALL，将约束所有有效自由度。
- VALUE：自由度约束位移值或表型数组名称。

命令D可用于给某些节点定义一个初值，而不对其之后的行为产生影响。具体方法为：先用D命令定义某一自由度值，随后立即用DDELE命令将其删除。

```
F,NODE,Lab,VALUE,VALUE2,NEND,NINC
```

命令F用于为选定节点施加集中荷载。

- NODE：将要加载的节点编号，也可以使用ALL或组件名。
- Lab：集中荷载标识符，如FY、MX等。
- VALUE：集中荷载值或表型数组名称。

```
SF,Nlist,Lab,VALUE,VALUE2
```

命令SF用于对一系列节点施加面荷载。

- Nlist：节点列表，可以使用ALL或组件名，即加载的对象。
- Lab：面荷载标识符，如结构分析中的PRES。
- VALUE：面荷载值或表型数组名称。
- VALUE2：复数输入时面荷载的虚部值。

```
SFE,ELEM,LKEY,Lab,KVAL,VAL1,VAL2,VAL3,VAL4
```

SFE命令用于在单元上施加面荷载。

- ELEM：单元号，也可以使用 ALL 或组件名。
- LKEY：与面荷载相关的荷载控制参数，默认为 1。详见具体单元帮助文件。
- Lab：面荷载标识符，结构分析中为 PRES。
- KVAL：确定 VAL1 ~ VAL4 为实部或虚部。
- VAL1：第 1 个面荷载值或表型数组名称。
- VAL2 ~ VAL4：面上节点的其余面荷载值。

```
LDREAD,Lab,LSTEP,SBSTEP,TIME,KIMG,Fname,Ext,--
```

命令 LDREAD 用于施加耦合场荷载，在多场耦合分析中非常常用。

- Lab：荷载标识符，可以取如下值。
  - TEMP：来自热分析的温度值。
  - PRES：来自 FLOTRAN 分析中的压力。
  - REAC：来自任何分析中的支座反力。
- LSTEP：将要读入的荷载步数，默认为 1。
- SBSTEP：LSTEP 荷载步内的子步数，空或 0 表示最后一个子步。
- TIME：当 LSTEP 与 SUBSTEP 均为空时，将要读入的时间点。
- KIMG：当来自于谐分析的结果时，该参数控制读入实部或虚部数据。
- Fname：目录及文件名。默认为当前工作目录下的工作文件名。
- Ext：文件扩展名，默认为 RST。

3. *GET 命令

*GET 命令用于检索一个值并将它存储为一个标量参数或数组参数的一部分。*GET 命令可以方便地提取数据，既可以用于后处理，也可以用于前处理。

无论在建模、划分网格、加载求解还是求解完成的后处理中，能够熟练运用*GET 命令随心所欲地提取数据，标志着读者已经步入高阶 ANSYS 用户行列。

接下来将对*GET 命令进行详细介绍，其格式如下。

```
*GET,Par,Entity,ENTNUM,Item1,IT1NUM,Item2,IT2NUM
```

- Par：*GET 命令所产生的参数的名称。
- Entity：实体名称，如 NODE、LEM、KP、LINE、AREA、VOLU、PDS 等。
- ENTNUM：实体的编号或标识符。0（或空白）代表所有实体。
- Item1：实体项目名称。
- IT1NUM：指定 Item1 的编号或标识符（如有）。一些 Item1 的标识符不需要 IT1NUM 的值。
- Item2、IT2NUM：第 2 组的项目标识符和编号，以进一步限定项目要检索数据。大多数项目不需要这样的信息级别。

*GET 检索指定项目并存储为一个标量参数，或者作为用户命名数组中的一个值。项目由不同关键字、标识符和数字组合确定。除了该参数值是先前输入的或是从计算结果中检索的，*GET 命令与* SET 命令用法类似。例如：

```
*GET,A,ELEM,5,CENT,X ! 提取 5 号单元的重心 X 坐标值并作为参数 A 的值进行存储
```

除非单独说明，*GET 命令提取的坐标值总是基于当前激活的坐标系。

当 Entity = ACTIVE，ENTNUM = 0（or blank）时，*GET 命令在前处理器中各参数的含义见表 7-8。

表 7-8　Entity = ACTIVE，ENTNUM = 0（or blank）

Item1	IT1NUM	描　述
CSYS		激活的坐标系
DSYS		激活的显示坐标系
MAT		激活的材料属性
TYPE		激活的单元类型
REAL		激活的实常数设置
ESYS		激活的单元坐标系
SECT		激活的截面设置
CP		模型中耦合节点组数的最大值（在被压缩之前包含删除、合并的节点）
CE		模型中约束方程个数的最大值（在被压缩之前包含删除、合并的约束方程）
WFRONT	MAX，RMS	电流最大值或 RMS 波阵面。如果没有完成重新排序则取 0

当 Entity = AREA，ENTNUM = N（area number）时，*GET 命令在前处理器中各参数的含义见表 7-9。

表 7-9　Entity = AREA，ENTNUM = N（area number）

Item1	IT1NUM	描　述
ATTR	标识符	标识符项目编号。标识符可取 MAT、TYPE、REAL、ESYS、KB、KE、SECN、NNOD、NELM 或 ESIZ（NNOD = 节点号，NELM = 单元号，ESIZ = 单元尺寸）
ASEL		面选择的状态。N = -1，未选择；N = 0，未定义；N = -1，已选择
NXTH		比 N 小的最大面编号（未找到则取 0）
NXTL		比 N 大的最小面编号（未找到则取 0）
AREA		N 号面的面积
LOOP	1，2，…，I	围成闭合环的 I 的线号

当 Entity = AXIS，ENTNUM = 0（or blank）时，*GET 命令在前处理器中各参数的含义见表 7-10 所示。

表 7-10　Entity = AXIS，ENTNUM = 0（or blank）

Item1	IT1NUM	描　述
COUNT	--	已定义的截面参数个数
NUM	MAX	截面参数编号的最大值

当 Entity = AXIS，ENTNUM = 轴截面编号时，*GET 命令在前处理器中各参数的含义见表 7-11 所示。

表 7-11 Entity = AXIS，ENTNUM = 轴截面编号

Item1	IT1NUM	描述
TYPE	--	截面类型
NAME	--	指定编号的截面名称
DATA	nnn	指定编号的截面位置

当 Entity = CDSY，ENTNUM = 坐标系号时，* GET 在前处理器中的参数含义见表 7-12。

表 7-12 Entity = CDSY，ENTNUM = 坐标系号

Item1	IT1NUM	描述
LOC	X、Y、Z	原点在全局笛卡儿坐标系中的位置
ANG	XY，YZ，ZX	相对全局的笛卡儿坐标系 THXY、THYZ 或 THZX 旋转角度
ATTR	Name	Name 的编号，Name 可取 KCS、KTHET、KPHI、PAR1、PAR2，如果坐标系未定义则返回 -1.0
NUM	MAX	坐标系号的最大值

当 Entity = CE，ENTNUM = N（约束方程号）时，* GET 在前处理器中参数含义见表 7-13。

表 7-13 Entity = CE，ENTNUM = N（约束方程号）

Item1	IT1NUM	描述
当 N = 0		
MAX		约束方程最大编号
NUM		约束方程编号
当 N > 0		
NTERM		约束方程条件的个数
CONST		约束方程的常项
TERM	number	Item2 = NODE：约束方程中在此位置的节点号
		Item2 = DOF：此位置的约束方程的自由度数
		Item2 = COEF：此位置的约束方程的系数

当 Entity = CMPB，ENTNUM = N（复合梁截面编号）时，* GET 命令参数含义见表 7-14。

表 7-14 Entity = CMPB，ENTNUM = N（复合梁截面编号）

Item1	IT1NUM	描述
COUNT		已定义的截面个数，如果 Item1 = COUNT，那么 N 是空白
NUM	MAX	截面编号最大值，如果 IT1NUM = MAX，那么 N 是空白
EXIS		如果截面存在且它是一个 CMPB 截面，则返回 1
NAME		通过 SECTYPE 命令定义的 8 个字符的截面名称

（续）

Item1	IT1NUM	描　　述
CBMX、CBTE、CBMD 之一		Item2 = NTEM（CBMX、CBTE、CBMD 数据的温度编号）
CBMX、CBTE、CBMD 之一		Item2 = TVAL，IT2NUM = nnn，nnn 是温度值（<= NTEM）
CBMX、CBTE、CBMD 之一	nnn	Item2 = TEMP，IT2NUM = tval，其中 nnn 是 CBMX、CBTE、CBMD 数据中的给定系数的位置，tval 是温度值

当 Entity = CP，ENTNUM = N（耦合节点集）时，*GET 命令在前处理器中的参数含义见表 7-15。

表 7-15　Entity = CP，ENTNUM = N（耦合节点集）

Item1	IT1NUM	描　　述
N = 0		
MAX		耦合集编号最大值
NUM		耦合集个数
N > 0		
DOF		该耦合集的自由度
NTERM		该耦合集的节点数
TERM	number	Item2 = NODE：给出该位置耦合节点号

当 Entity = CSEC，ENTNUM = 0 时，*GET 命令在前处理器中的参数含义见表 7-16。

表 7-16　Entity = CSEC，ENTNUM = 0

Item1	IT1NUM	描　　述
COUNT	--	已定义的接触面数
NUM	MAX	最大接触面编号

当 Entity = CSEC，ENTNUM = ID（接触面编号），*GET 命令在前处理器中的参数含义见表 7-17。

表 7-17　Entity = CSEC，ENTNUM = ID（接触面编号）

Item1	IT1NUM	描　　述
TYPE	--	接触面类型
NAME	--	指定编号的接触面名称
DATA	nnn	nnn 是 SECDATA 命令中指定编号的接触面的名称

当 Entity = EDCC，ENTNUM = N（接触实体编号，由 EDCLIST 获得）时，*GET 命令在前处理器中的参数含义见表 7-18。

表 7-18　Entity = EDCC，ENTNUM = N（接触实体编号，由 EDCLIST 获得）

Item1	IT1NUM	描　　述
COMP	1，2	接触实体 N 的接触面（1）或目标面（2）的组件名
PART	1，2	接触实体 N 的接触面（1）或目标面（2）的零件名

当 Entity = ELEM，ENTNUM = N（单元号）时，*GET 命令在前处理器中的参数含义如表 7-19 所示。

表 7-19　Entity = ELEM，ENTNUM = N（单元号）

Item1	IT1NUM	描　述
NODE	1，2，… 20	单元节点号
CENT	X、Y、Z	质心坐标
ADJ	1，2，… 6	相邻面编号
ATTR	Name	标识符 Name 的编号，Name = MAT、TYPE、REAL、ESYS、PSTAT、LIVE、SECN
LENG		一维单元长度
LPROJ	X、Y、Z	一维单元投影长度
AREA		面单元面积
APROJ	X、Y、Z	面单元投影面积
VOLU		单元体积
ESEL		单元选择状态。N = -1，未选；N = 0，未定义；N = 1，已选
NXTH		N 以上的最小单元号（未找到则返回 0）
NXTL		N 以下的最大单元号（未找到则返回 0）
HGEN		单元 N 的产热量
HCOE	face	指定表面上的单元的传热系数
TBULK	face	指定表面上的单元的总体温度
PRES	face	指定表面上的单元的压力
SHPAR	Test	单元形状参数

当 Entity = ELEM，ENTNUM = 0 时，＊GET 命令在前处理器中的参数含义见表 7-20。

表 7-20　Entity = ELEM，ENTNUM = 0

Item1	IT1NUM	描　述
NUM	MAX，MIN	最大单元编号
NUM	MAXD，MIND	最小单元编号
COUNT		单元个数

当 Entity = KP，ENTNUM = N（关键点号）时，＊GET 命令在前处理器中的参数含义见表 7-21。

表 7-21　Entity = KP，ENTNUM = N（关键点号）

Item1	IT1NUM	描　述
LOC	X、Y、Z	关键点坐标
ATTR	Name	标识符 Name 对应的编号，Name = MAT、TYPE、REAL、ESYS、NODE、ELEM
KSEL		关键点选择状态
NXTH		N 以上最小的关键点号
NXTL		N 以下最大的关键点号
DIV		KESIZE 划分的单元分数

当 Entity = KP，ENTNUM = 0 时，* GET 命令在前处理器中的参数含义见表 7-22。

表 7-22 Entity = KP，ENTNUM = 0

Item1	IT1NUM	描　述
NUM	MAX，MIN	选中集中关键点号最大/最小值
NUM	MAXD，MIND	已定义的关键点最大/最小编号
COUNT		选中集中关键点个数
CENT	X、Y、Z	质心坐标
IOR	X、Y、Z，XY，YZ，ZX	原点惯性矩
IMC	X、Y、Z，XY，YZ，ZX	质心惯性矩
IPR	X、Y、Z	主惯性矩
IXV	X、Y、Z	主惯性矩 X 分量
IYV	X、Y、Z	主惯性矩 Y 分量
IZV	X、Y、Z	主惯性矩 Z 分量
MXLOC	X、Y、Z	选中集中坐标值最大的关键点
MNLOC	X、Y、Z	选中集中坐标值最小的关键点
NRELM	m	最靠近重心的单元的关键点数

当 Entity = LINE，ENTNUM = N（线号）时，* GET 命令在前处理器中的参数含义见表 7-23。

表 7-23 Entity = LINE，ENTNUM = N（线号）

Item1	IT1NUM	描　述
KP	1，2	在 1、2 处的关键点（即线的两端）
ATTR	Name	根据标识符 Name 选出的线号，Name = MAT、TYPE、REAL、ESYS、NNOD、NELM、NDIV、NDNX、SPAC、SPNX、KYND、KYSP、LAY1、LAY2
LSEL		选择状态
NXTH		不大于 N 最大的线号
NXTL		不小于 N 最小的线号
LENG		线的长度

当 Entity = LINE，ENTNUM = 0（或空白）时，GET 命令在前处理器中的参数含义见表 7-24。

表 7-24 Entity = LINE，ENTNUM = 0（或空白）

Item1	IT1NUM	描　述
NUM	MAX，MIN	选中集中最大/最小线号
NUM	MIND，MAXD	已定义最大/最小线号
COUNT		选中集中线数
LENG		选中线的总长度
CENT	X、Y、Z	质心坐标
IOR	X、Y、Z，XY，YZ，ZX	原点惯性矩
IMC	X、Y、Z，XY，YZ，ZX	重心惯性矩

（续）

Item1	IT1NUM	描　　述
IPR	X、Y、Z	主惯性矩
IXV	X、Y、Z	惯性矩 X 分量
IYV	X、Y、Z	惯性矩 Y 分量
IZV	X、Y、Z	惯性矩 Z 分量

当 Entity = NODE，ENTNUM = N（节点号）时，＊GET 命令在前处理器中的参数含义见表 7-25。

表 7-25　Entity = NODE，ENTNUM = N（节点号）

Item1	IT1NUM	描　　述
LOC	X、Y、Z	节点坐标
ANG	XY，YZ，ZX	THXY、THYZ、THZX 转角
NSEL		选择状态
NXTH		不大于 N 最大的节点号
NXTL		不小于 N 最小的节点号
F	FX，MX，…	节点 N 处的集中荷载值
D	UX，ROTX，…	节点 N 处的约束值
HGEN		节点 N 处的热生成量
NTEMP		节点 N 处的温度
CPS	Lab	耦合节点集的标识符

当 Entity = NODE，ENTNUM = 0（或空白）时，＊GET 命令在前处理器中的参数含义见表 7-26。

表 7-26　Entity = NODE，ENTNUM = 0（或空白）

Item1	IT1NUM	描　　述
NUM	MAX，MIN	选中集中的最大/最小节点号
NUM	MAXD，MIND	已定义的最大/最小节点号
COUNT		选中集中的节点数
MXLOC	X、Y、Z	选中集中节点坐标最大的节点
MNLOC	X、Y、Z	选中集中节点坐标最小的节点

7.2　APDL 命令流应用详解

经过前文的介绍，相信读者已对 APDL 语言基础知识有了一定的了解。本节将结合实例，演示 ANSYS 参数化设计语言的实际应用，以加深读者的理解，也方便在后文中介绍 APDL 与 GUI 的综合应用。

7.2.1 模型的建立

本节将从最基础的建立模型开始，讲解 APDL 语言的应用。

本例将为读者介绍一个工字梁模型的建立过程。本例的大型工字梁高 1 m，宽 0.5 m，翼板厚 0.1 m，腹板厚 0.1 m，梁长 3 m，梁腹板正中有 0.5 m×1 m 的圆角方孔，圆角半径为 0.1 m。

本例完成建模后，将对其上表面施加 1 kN 的竖向载荷，两端固定。

本例是自底向上建模，即从点开始，最后发展成体。

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，弹出 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。

在该窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 框中输入工作目录名称，在 Job Name 框中输入项目名称 7－1，单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。

（2）在 GUI 界面的命令输入框中输入并运行如下命令。

```
/prep7                    ! /prep7 命令用于进入前处理器
k,1,,0.5,0                ! 命令 K 用于定义关键点
k,2,,0.5,0.25             ! 命令 K 的使用方法为 K,NPT,X,Y,Z
k,3,,0.4,0.25             ! NPT 为关键点号
k,4,,0.4,0.05             ! X、Y、Z 为关键点坐标
k,5,,-0.4,0.05
k,6,,-0.4,0.25
k,7,,-0.5,0.25
k,8,,-0.5,0
```

用户可以直接在命令输入框中输入，也可以复制、粘贴到命令输入框，按〈Enter〉键运行，运行结果应如图 7-15 所示。

此外，还可以在 GUI 界面中通过选择如下命令定义关键点。

- Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS。
- Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > On Working Plane

（3）完成关键点定义后，将它们连成面。运行如下命令。

```
a,1,2,3,4,5,6,7,8         ! 命令 A 用于将点围成面
                          ! 命令 A 最多可连接 18 个点
```

完成连接后的面应如图 7-16 所示。

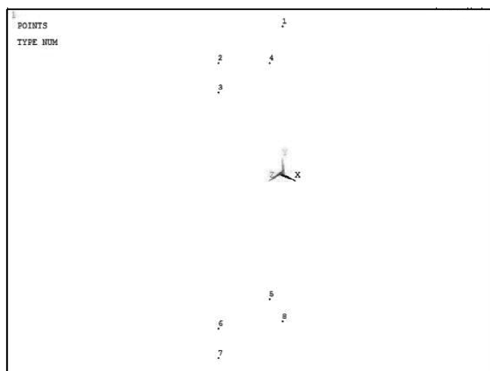


图 7-15　生成关键点

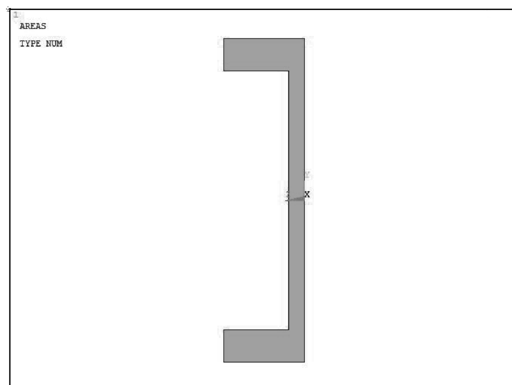


图 7-16　围成面

（4）完成截面生成后，再将其拉伸成梁。运行如下命令。

```
vext,all,,,3,0,0
```

完成拉伸后应如图 7-17 所示。

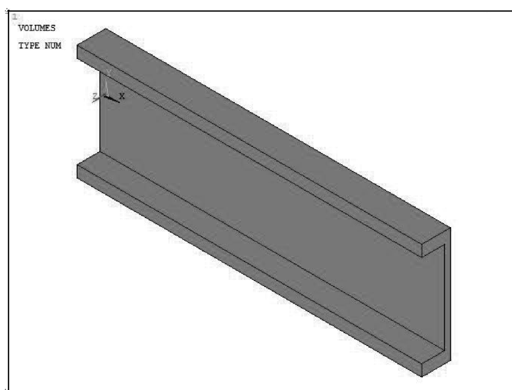


图 7-17 拉伸

（5）一半的梁的基本形状完成后，在腹板上打孔。首先要绘制出孔的形状，运行如下命令。

```
k,,2,0.25          ! 定义方孔角点
k,,2,-0.25
k,,1,-0.25
k,,1,0.25
l,17,18            ! L 命令将关键点连为矩形
l,18,19
l,19,20
l,20,17
```

在 GUI 界面工作区中应生成如图 7-18 所示的线框。

（6）继续运行如下命令，将矩形进行圆角操作。

```
lfillt,28,25,0.1
lfillt,25,26,0.1
lfillt,26,27,0.1
lfillt,27,28,0.1
```

生成的圆角如图 7-19 所示。

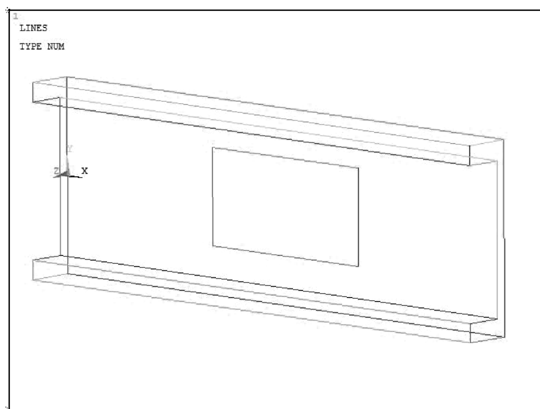


图 7-18 方孔基本形状

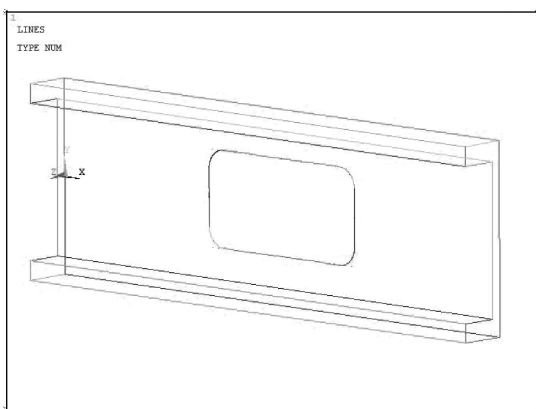


图 7-19 圆角

（7）圆角后再将 25、30、26、31、27、32、28、29 号线围成面。运行如下命令，生成图 7-20 所示的面。

```
al,25,30,26,31,27,32,28,29
```

继续运行如下命令，将上一步生成的面拉伸成体，如图 7-21 所示。

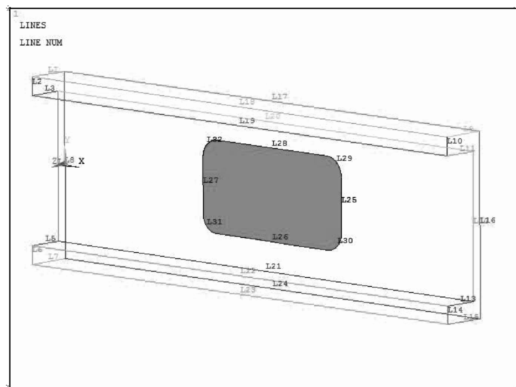


图 7-20　生成面

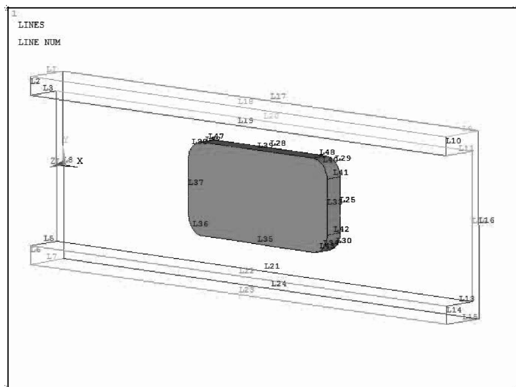


图 7-21　拉伸成体

（8）接下来，将梁本体减去孔的形状即可。运行如下命令，生成如下带孔的一半的梁，如图 7-22 所示。

```
vsbv,1,2
```

完成空腹梁的基本形状后，将其沿 Z 方向也就是以 XY 平面为对称面进行镜像操作。运行如下命令。

```
vsymm,z,all
vadd,all
```

至此，模型的建立已经完成，如图 7-23 所示。

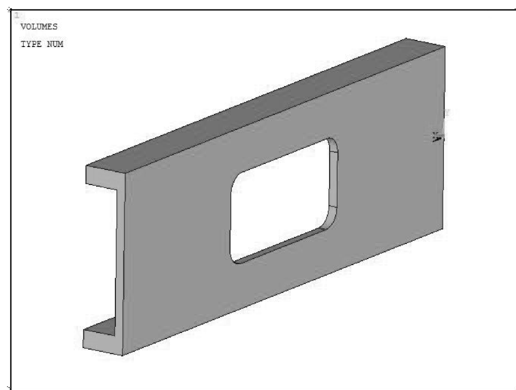


图 7-22　两体相减

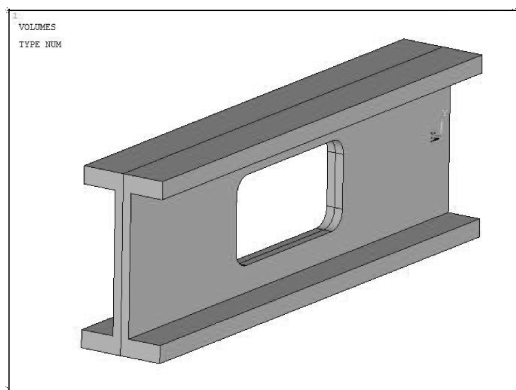


图 7-23　完成建模

7.2.2 网格划分

按照一般的分析思路，完成建模后即设置单元属性、划分网格。请读者参考 7.2.1 节，建立图 7-24 所示工字梁的模型。

运行如下命令，设置单元属性。

```
et,1,92              ！定义单元 1 为 92 号单元
mp,ex,1,2e11         ！定义材料 1 为线弹性材料,指定弹性模量
mp,prxy,1,0.3        ！定义材料 1 为各向同性材料,指定泊松比
```

习惯上，这一部分应该在命令流的开始即完成定义，然后进行建模操作。

完成单元属性设置后，运行如下命令。

```
esize,0.1,0          ！单元边长
mshape,1,3d          ！使用四面体单元
mshkey,0             ！使用自由网格划分
vmesh,all            ！划分单元
```

此时即完成网格划分，如图 7-25 所示。

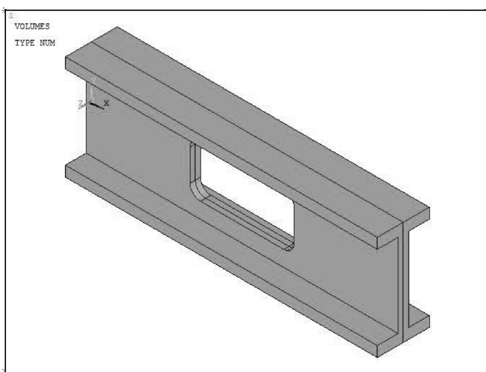


图 7-24 生成模型

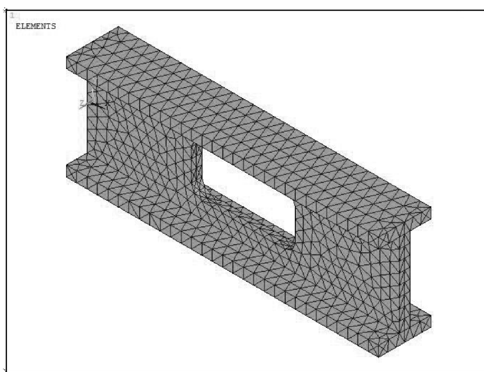


图 7-25 完成网格划分

7.2.3 边界条件

完成网格划分后，即可对模型进行加载处理。请读者参考 7.2.1 节与 7.2.2 节，建立模型、设置单元属性并完成网格划分，得到有限元模型。

运行如下命令，选出梁端面的节点。

```
nsel,s,loc,x,0          ！选中 X=0 与 X=3 的节点
nsel,a,loc,x,3
```

选出的节点应如图 7-26 所示。

所选节点即为施加边界条件的对象。运行如下命令，对所选节点的自由度进行约束。

```
d,all,all               ！约束自由度
```

完成约束的节点应如图 7-27 所示，此时完整模型如图 7-28 所示。

完成约束后，将进行施加荷载操作。运行如下命令，选出施加荷载的节点。

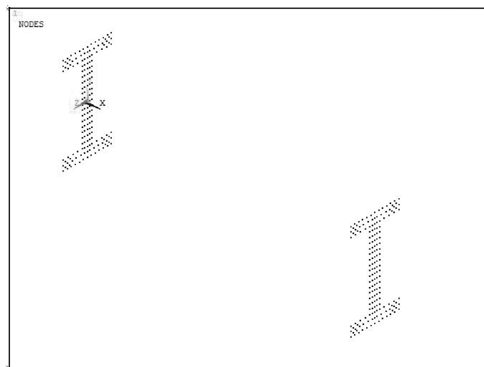


图 7-26 端面节点

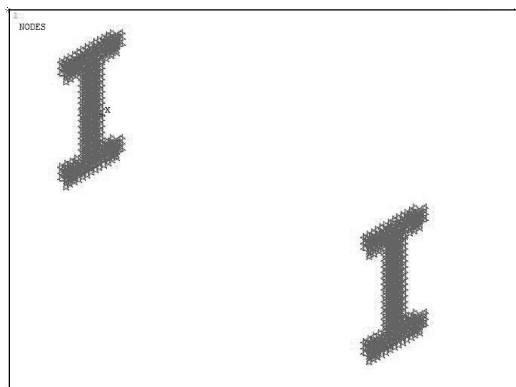


图 7-27　约束自由度

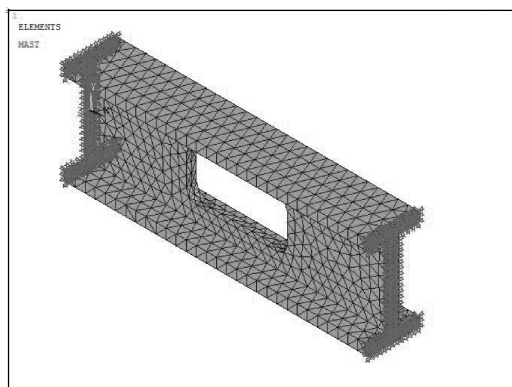


图 7-28　模型

```
nsel,s,loc,x,1.5                ! 选中加载节点
nsel,r,loc,y,0.5
nsel,r,loc,z,0
```

选出的节点为上表面中央节点。继续运行如下命令。

```
f,all,fy,-1000                  ! 施加载荷
fini
```

完成加载的节点如图 7-29 所示。此时，完成边界条件设置的模型如图 7-30 所示。

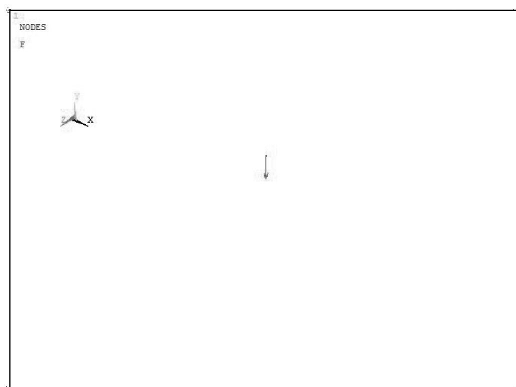


图 7-29　加载后的节点

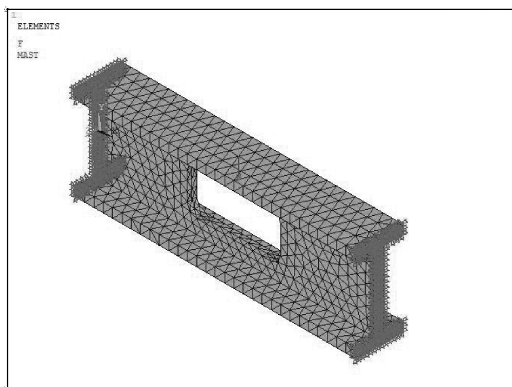


图 7-30　完成边界定义

7.2.4 求解

模型准备就绪，即可开始求解。读者请参考前文介绍，自行完成建模、网格划分与边界设置的操作，得到可用于计算的模型。

运行如下命令。

```
/SOLU                           ! 进入求解器求解
nsel,all
solve
fini
```

完成求解后如图 7-31 所示。

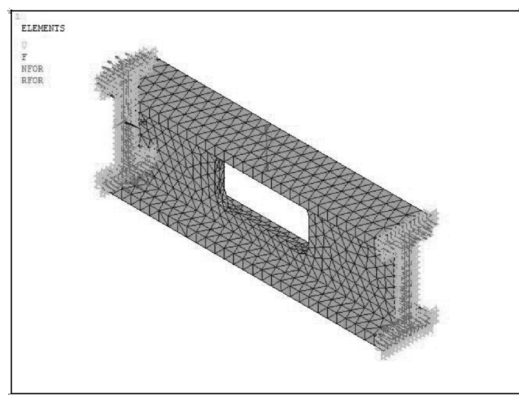


图 7-31 完成求解

此时在工作区中即可看到以图形方式显示的计算结果。

7.3 本章小结

本章为读者介绍了 ANSYS 参数化设计语言（ANSYS Parametric Design Language，APDL）的基础知识。

APDL 语言是步入高阶用户的必经之路，具有熟练掌握 APDL 语言，才能处理复杂的问题。

读者可以参考本章示例，一步一步执行操作，观察命令运行的结果。有了一定的了解之后，合上书自己动手编写命令流，分析自行编写的命令与本书所给示例的异同与优劣。初识 APDL 的用户可能会略觉得繁琐，但用户多读代码、多写代码后，一定可编写出比本书示例更为高效的分析程序。

第二篇

机械工程应用篇

本篇以实例为主导，为读者讲解 ANSYS 有限元分析在工程中的应用方法。在精选的工程实例引导下，读者可以逐步深入地理解 ANSYS 有限元分析的方法与思想，在实战中提高分析问题的能力。

在本篇中，循序渐进、由浅入深地向读者展现了如何从零开始建立实际问题的模型，如何选择 ANSYS 的不同功能与分析方法以应对不同的分析对象，以及如何综合运用 APDL 命令流与 GUI 操作以达到较高效率。

第 8 章结构静力学分析，结合实例讲解机械行业中的实际分析方法，并介绍了如何在实际问题中将复杂问题简化为可以分析计算的实用模型。

第 9 章结构动力学分析，主要讲解结构动力学的基础知识，并结合实例介绍了不同类型的分析方法。

第 10 章加工过程仿真分析，针对机械行业中的金属热加工过程，结合实例讲解了如何进行热力学分析、耦合场分析等。

第 11 章装配与复合材料分析，结合装配实例讲解了非线性的、复杂多体模型的分析方法。

第 12 章锤击法施工仿真分析，着重讲解了 LS－DYNA（显式动态分析）的使用方法，并结合实例进行演练。

第 13 章起重机综合分析，全面展示了如何灵活、综合性地运用多种分析方法，解决实际工程问题。

第 8 章 结构静力学分析

结构分析是有限元分析方法最常用的一个应用领域。结构是一个广义的概念，包括土木工程结构，如桥梁和建筑物；汽车结构，如车身骨架；海洋工程结构，如海洋石油钻井平台结构；航空器结构，如飞机机身；以及机械零部件，如活塞、传动轴等。例如在一台机械设备中，可以这样理解，即可以发生相对运动的称为机构，不能发生相对运动的称为结构。

8.1 基础知识

静力学分析主要用来计算在固定不变的荷载作用下结构的响应，它不考虑惯性和阻尼影响，如结构受随时间变化荷载作用的情况。不过，它可以计算那些固定不变的惯性荷载对结构的影响（如重力和离心力），以及那些可以近似为等价静力作用的随时间变化荷载（如许多建筑规范中所定义的等价静力风载和地震荷载）的作用。

运用静力学分析，可以计算由那些不包括惯性和阻尼效应的荷载作用于结构或部件上引起的位移、应力、应变和力。固定不变的荷载和响应是一种假定，即假定荷载和结构响应随时间的变化非常缓慢。静力学分析所施加的荷载包括：外部施加的作用力和压力、稳态的惯性力（如重力和离心力）、强迫位移、温度荷载（对于温度应变）、能流（对于核能膨胀）等。

结构静力学分析的基本流程可以分为 3 个阶段：建模、加载与求解、结果分析。

1. 建模

首先用户应指定作业名和分析标题，然后通过/PREP7 前处理模块定义单元类型、实常数、材料属性、模型的几何元素。对大多数分析类型来说，这些步骤都具必需的。

在进行静力学分析时，要注意如下事项。

- 可以采用线性或非线性结构单元。
- 材料属性可以是线性或非线性、各向同性或正交各向异性、常数或与温度相关的。
- 必须按某种形式定义刚度（如弹性模量 EX、超弹性系数等）。
- 对于惯性载荷（如重力等），必须定义质量计算所需的数据，如密度 DENS。
- 对于温度载荷，必须定义热膨胀系数 ALPX。
- 对于网格密度，应力或应变急剧变化的区域（通常是用户感兴趣的区域），需要比应力或应变近乎常数的区域较密的网格；在考虑非线性的影响时，要用足够的网格来得到非线性效应。例如，塑性分析需要相当大的积分点密度，因而在高塑性变形梯度区需要较密的网格。

2. 加载与求解

完成模型的建立后，即可以开始加载。结构静力学分析中可以使用的荷载有如下几种。

（1）位移（UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ）：这些自由度约束常施加到模型边界上，用以定义刚性支承点。它们也可以用于指定对称边界条件以及已知运动的点。由标号指定的方向是按照节点坐标系定义的。

（2）力（FX、FY、FZ）和力矩（MX、MY、MZ）：这些集中力通常在模型的外边界上指定。其方向是按节点坐标系定义的。

（3）压力（PRES）：这是表面荷载，通常作用于模型的外部。正压力指向单元面（起到压缩的效果）。

（4）温度（TEMP）：用于研究热膨胀或热收缩（即温度应力）。如果要计算热应变的话，必须定义热膨胀系数。用户可以从热分析［LDREAD］中读入温度，或者直接指定温度（通过 BF 族命令）。

（5）流（FLUE）：用于研究膨胀（由于中子流或其他原因而引起的材料膨胀）或蠕变的效应。只在输入膨胀或蠕变方程时才能使用。

（6）重力、旋转等：整个结构的惯性荷载。如果要计算惯性效应，必须定义密度（或某种形式的质量）。

除了与模型无关的惯性荷载以外，用户可以在模型的几何实体（关键点、线、面）或有限元模型（节点和单元）上定义荷载。

完成加载后即可以求解。

3. 结果分析

静力学分析结果保存于结构分析结果文件（Jobname. RST）中，主要包括以下内容。

- 基本解：节点位移（UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ）。
- 导出解：节点和单元应力、节点和单元应变、单元力、节点反力等。

典型的后处理操作有如下几种。

（1）显示变形图：通过 PLDISP 命令（对应 GUI 方式：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape）来显示变形图。借助于 PLDISP 命令的 KUND 参数，用户可以在原始图上叠加变形图。

（2）列出反力和反力矩：通过 PRESOL 命令（对应 GUI 方式：Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu）列出约束节点的反力和反力矩。

（3）列出节点力和力矩：通过 PRESOL、F（或 M）命令（对应 GUI 方式：Main Menu > General Postproc > List Results > Element Solution）列出节点力和力矩。

此外，也可以列出所选节点集中的所有节点的力和力矩。首先选择节点集，然后列出作用于这些节点上的所有力和力矩。

- APDL 命令：FSUM。
- GUI 方式：Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Total Force Sum。

用户还可以在每个已选择的节点上检查所有力和力矩。对于处于平衡状态的实体，除荷载作用点和存在反力的节点以外的所有节点上，其总荷载为 0。

- APDL 命令：NFORCE。

- GUI 方式：Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Sum@ EachNode。

（4）线单元结果：对于线单元（如梁、杆、管），通过 ETABLE 命令（对应 GUI 方式：Main Menu > General Postproc > Element Table > Define Table）来取得导出数据（如应力、应变等）。结果数据用一个标号和一个序列号的组合，或用元件名来区别。

（5）误差评估：在实体和壳单元的线性静力分析中，通过 PRERR 命令（对应 GUI 方式：Main Menu > General Postproc > List Results > Percent Error）列出网格离散误差的评估值。该命令按结构能量模（SEPC）计算和列出误差百分比，代表一个特定的网格离散的相对误差。

（6）结构能量误差评估：通过 PLESOL、SERR 命令来计算单元之间的结构能量误差（SERR）。在等值线图中，SERR 较大的区域是要进行网格细化的候选区域。

（7）等值线显示：通过 PLNSOL 和 PLESOL 命令（对应 GUI 方式：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu or Element Solu）可以显示几乎所有结果项的等值线，如应力（SX、SY、SZ 等）、应变（EPELX、EPELY、EPELZ 等）和位移（UX、UY、UZ 等）。借助于 PLNSOL 和 PLESOL 命令的 KUND 参数，用户可以在原始结构上叠加显示等值线。

通过 PLETAB 和 PLLS 命令（对应 GUI 方式：Main Menu > General Postproc > Element Table > Plot Element Table 和 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot Line Elem Res）可以显示单元表数据和线单元数据的等值线。

注意：导出数据，如应力、应变，在应用 PLNSOL 命令时为节点上的平均值。这种平均的结果对于不同材料、不同厚度的壳或其他不连续体，会得出错误的结果。为了避免这一问题，应当用选择命令来选择相同材料、相同厚度的壳等，然后才能应用 PLNSOL 命令。另一种方法，是应用 PowerGraphics 及 AVRES 命令以使在不同材料、不同厚度的壳上不产生平均应力。

（8）矢量显示：通过 PLVECT 命令（对应 GUI 方式：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot Predefined）来观察矢量的显示，通过 PRVECT 命令（对应 GUI 方式：Main Menu > General Postproc > List Results > Vector Data）来观察矢量列表。如要观察矢量，如位移（DISP），转角（ROT），主应力（S1、S2、S3），矢量显示（不要与矢量模态混淆）是一种有效的方法。

（9）列表显示：可通过下列命令来进行实现列表显示。

- APDL 命令：PRNSOL（节点结果）、PRESOL（单元之间结果）、PRRSOL（反力）等。
- GUI 方式：Main Menu > General Postproc > List Results > Solution Option。

在列表前，可通过 NSORT 和 ESORT 命令（对应 GUI 方式：Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing Sort Nodes or Sort Elems）进行数据排序。

8.2 六角扳手静力学分析

8.2.1 问题描述

如图 8-1 所示的六角扳手，在其上作用 100N 的水平荷载与 20N 的竖向荷载，分析其结

构强度是否满足要求。

8.2.2 问题求解与分析

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，弹出 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。

（2）在该窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 框中输入工作目录名称，在 Job Name 框中输入项目名称 8-2。

（3）单击 Run 按钮，进入 ANSYS 17.0 GUI 界面。在 GUI 界面中选择 Main menu > Preferences 命令，弹出图 8-2 所示的 Preferences for GUI Filtering 对话框。在该对话框中，选择分析类型为 Structural，单击 OK 按钮，完成分析环境设置。

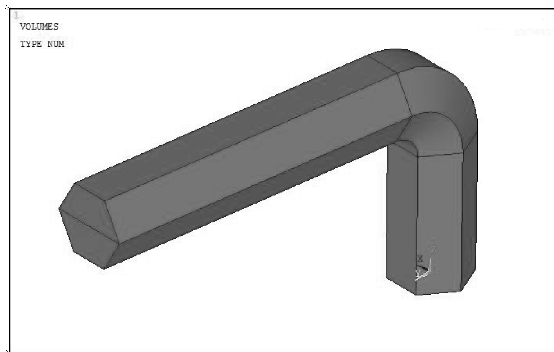


图 8-1　六角扳手模型

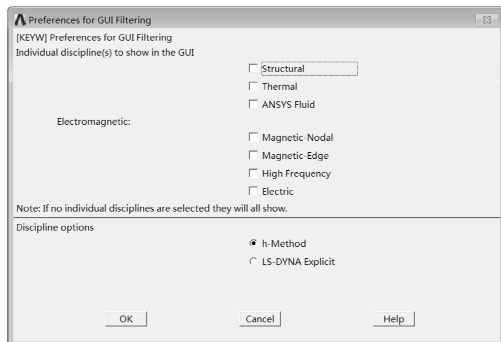


图 8-2　Preferences for GUI Filtering 对话框

（4）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，弹出图 8-3 所示的 Library of Element Types 对话框。在该对话框中，设置 1 号单元类型为 Mesh Facet200，单击 Apply 按钮，设置 2 号单元类型为 SOLID185，单击 OK 按钮。

回到 Element Types 对话框，选择 1 号单元，单击 Options 按钮，弹出如图 8-4 所示的 MESH200 element type options 对话框。在该对话框中，设置 Element shape and # of nodes K1 为 QUAD 8 - NODE。

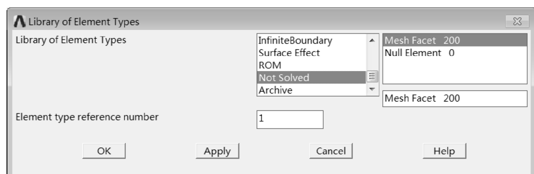


图 8-3　Library of Element Types 对话框

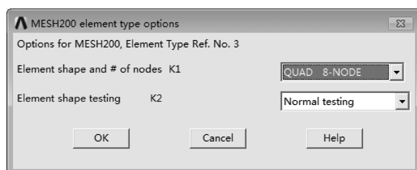


图 8-4　MESH200 element type options 对话框

（5）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，在弹出的图 8-5 所示 Define Material Model Behavior 对话框。选择结构、线性、弹性、各向

同性材料，弹出图 8-6 所示的 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，从中输入弹性模量与泊松比，单击 OK 按钮。

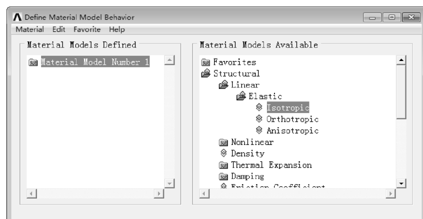


图 8-5　Define Material Model Behavior 对话框

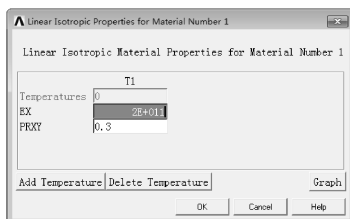


图 8-6　Linear Isotropic Propercies for Material Number 1 对话框

（6）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Polygon > Hexagon，弹出图 8-7 所示的 Hexagonal Area 对话框，设置 Radius 为 0.01，单击 OK 按钮，生成一个六边形，如图 8-8 所示。

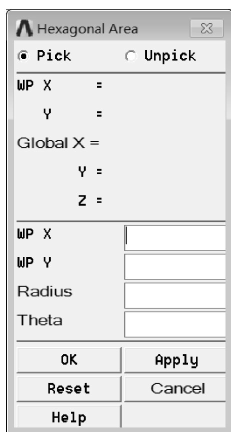


图 8-7　Hexagonal Area 对话框

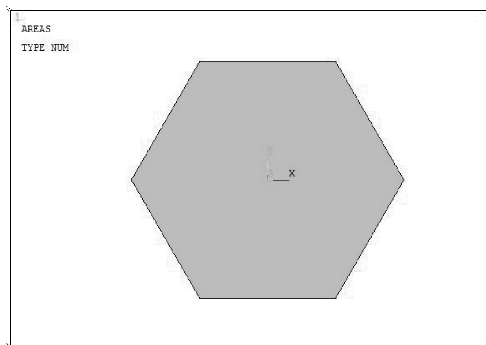


图 8-8　生成六边形

（7）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS 命令，弹出图 8-9 所示的 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。

在 NPT keypoint number 框中输入关键点编号 7，其余留空，单击 Apply 按钮；以同样方法定义 8 号关键点，设置 Z = 0.05，其余留空，单击 APP 以按钮；继续定义，9 号关键点，设置 Y = 0.1、Z = 0.05，单击 OK 按钮。

完成定义的关键点如图 8-10 所示。

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line 命令，拾取工作区中的 7、8 号关键点，单击 Apply 按钮；继续拾取 8、9 号关键点，单击 OK 按钮，完成连线后如图 8-11 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Line Fillet 命令，拾取工作区中的 7 号线与 8 号线，单击 OK 按钮，弹出图 8-12 所示的 Line Fillet 对话框。

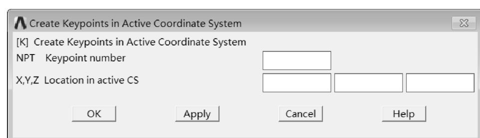


图 8-9 Create Keypoints in Active Coordinate System

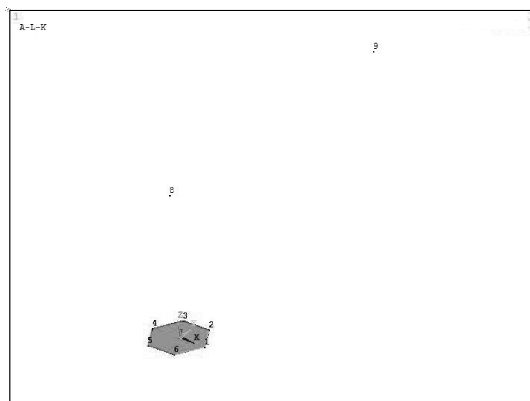


图 8-10 关键点

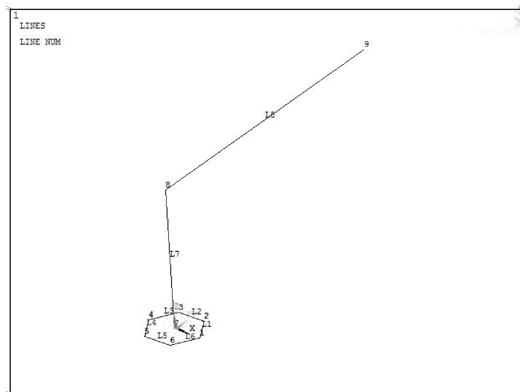


图 8-11 连线

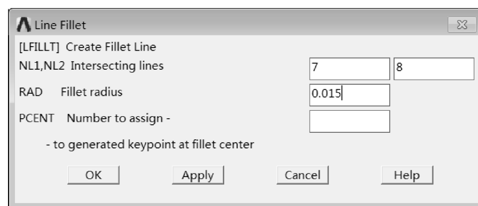


图 8-12 Line Fillet 对话框

在该对话框中设置 RAD Fillet radius（即圆角半径）为0.015，单击 OK 按钮，生成7、8号线圆角，如图 8-13 所示。

（9）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line 命令，拾取工作区中的 1、4 号关键点，单击 OK 按钮，将 1、4 号点连接起来，如图 8-14 所示。

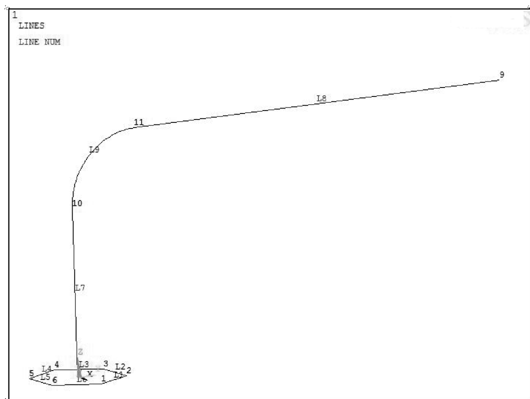


图 8-13 生成圆角

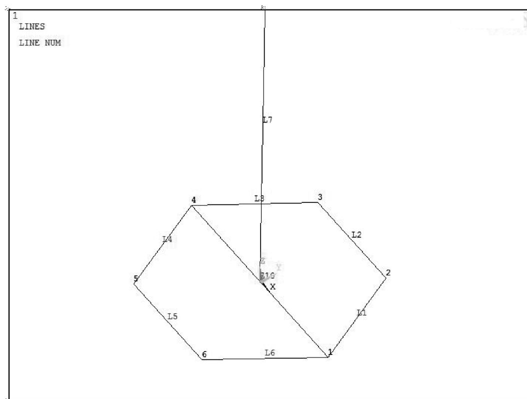


图 8-14 连接 1、4 号点

（10）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Area by Line 命令或 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > With Options > Area by Line 命令，拾取六边形面，再拾取 1、4 号点的连线，单击 OK 按钮，将面分割为两份，如图 8-15 所示。

（11）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > Picked Lines 命令，拾取 2 号线，单击 OK 按钮，在弹出的图 8-16 所示 Element Sizes on Picked Lines 对话框中设置单元划分份数为 3，单击 OK 按钮。

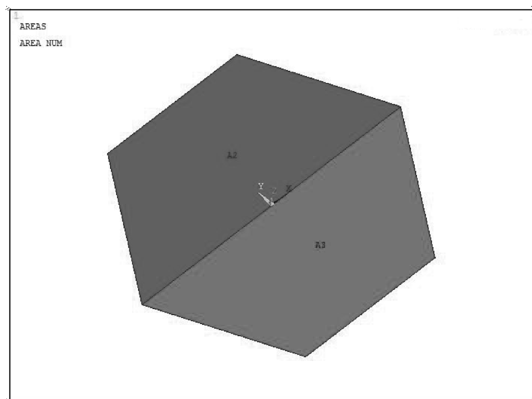


图 8-15　分割

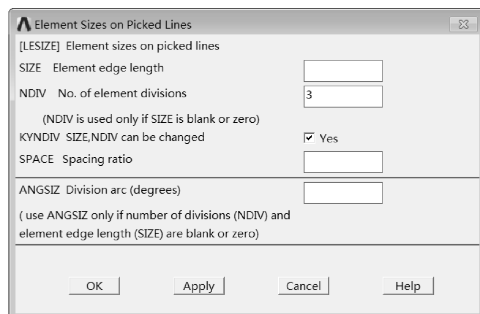


图 8-16　Element Sizes on Picked Lines 对话框

重复上述定义线划分份数的操作，将 3、4 号线均定义为划分为 3 份，被划分的线如图 8-17 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Lines > Picked Lines 命令，拾取 7 号线，单击 OK 按钮，在弹出的 Element Sizes on Picked Lines 对话框中定义单元边长为 0. 01，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Numbering 命令，在弹出的对话框中选中 Line Numbers 复选框，单击 OK 按钮，在工作区中显示线号。划分完成的结果如图 8-18 所示。

注意：完成线尺寸定义的线，被分为相应份数的虚线。

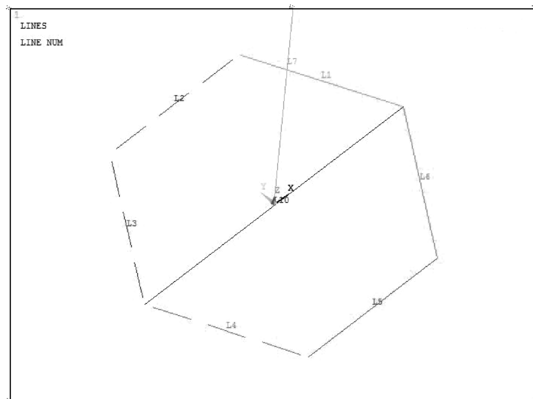


图 8-17　划分线

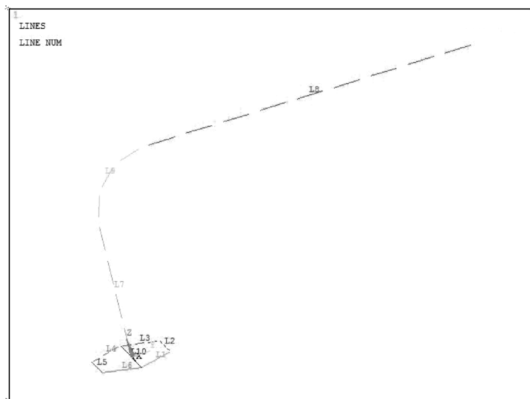


图 8-18　定义引导线划分

（12）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 Sided 命令，拾取六边形面，单击 OK 按钮，完成面单元划分，如图 8-19 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Lines 命令，先拾取六边形面，单击 OK 按钮，再拾取 3 段引导线（即 7、8、9 号线），单击 OK 按钮，完成拉伸网格，如图 8-20 所示。

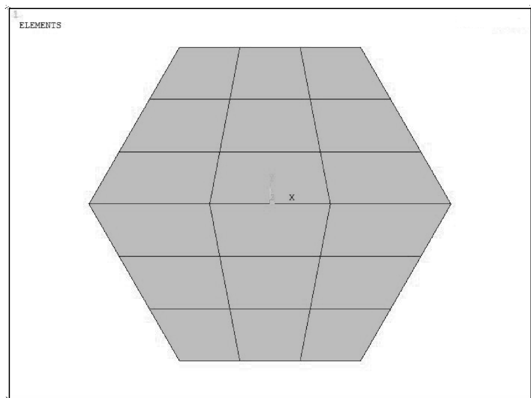


图 8-19　划分面单元

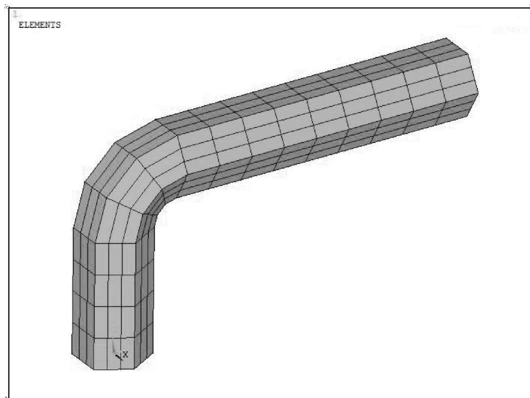


图 8-20　拉伸网格

在 GUI 中界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Clear > Areas 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，将面单元全部清除。

（13）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas 命令，拾取工作区中的 2 号面，单击 OK 按钮，弹出图 8-21 所示的 Apply U,ROT on Areas 对话框，选择要约束的自由度为 All DOF，单击 OK 按钮，完成约束，如图 8-22 所示。

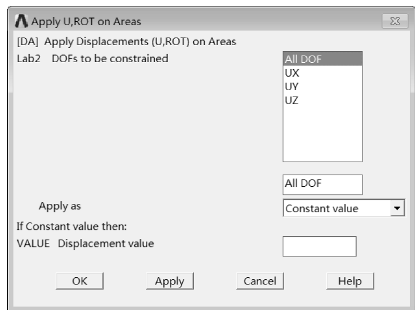


图 8-21　Apply U,ROT on Areas 对话框

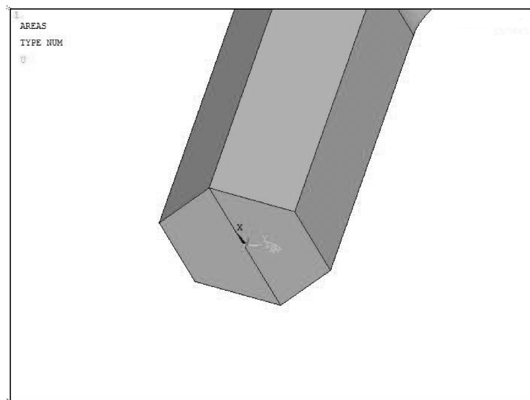


图 8-22　约束底面

继续在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas 命令，单击 OK 按钮，在弹出的 Apply U,ROT on Areas 对话框中选择要约束的自由度为 All DOF，单击 OK 按钮。此时，完成了底面的固定约束，如图 8-23 所示。

（14）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，弹出图 8-24 所示的 Select Entities 对话框，单击 OK 按钮。在拾取框中输入 24,29,1，单击 OK 按钮，选出图 8-25 所示的点。

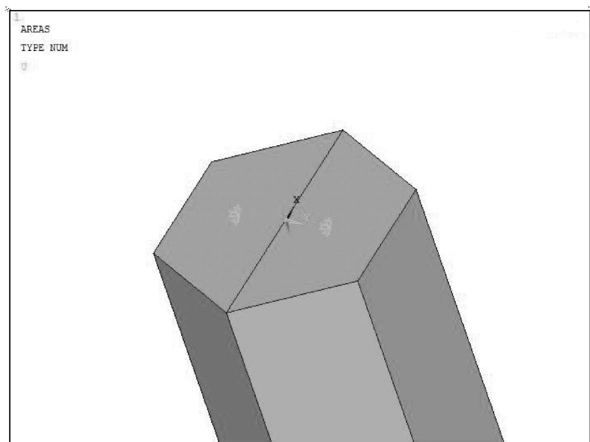


图 8-23　完成底面约束



图 8-24　Select Entities 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Keypoints 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，在弹出的图 8-26 所示 Apply F/M on KPs 对话框中输入荷载值为 100（见图 8-27），方向为 FX，单击 OK 按钮。



图 8-25　选出加载点

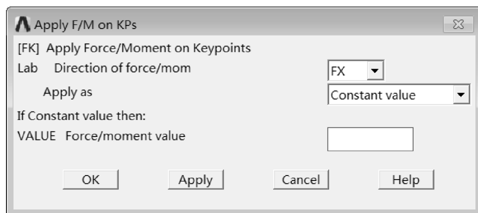


图 8-26　Apply F/M on KPs 对话框

重复上述操作，仍在这 6 个点上定义 FZ 方向荷载 20N，如图 8-27 所示。完成加载的模型如图 8-28 所示。

（15）完成荷载施加后，即可开始求解。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，弹出图 8-29 所示的/STATUS Command 窗口，其中显示了项目的求解信息及输出选项。

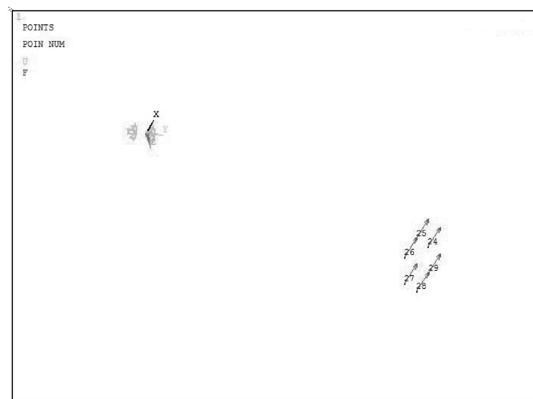


图 8-27　施加荷载

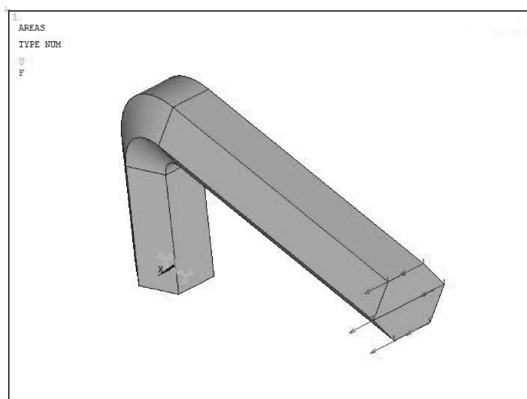


图 8-28　计算模型

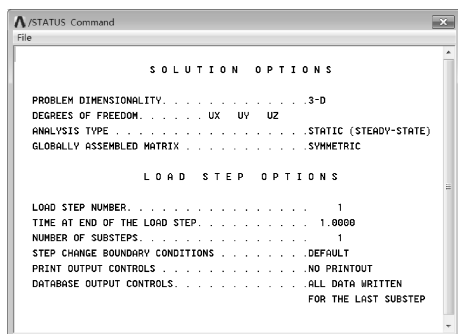


图 8-29　/STATUS Command 窗口

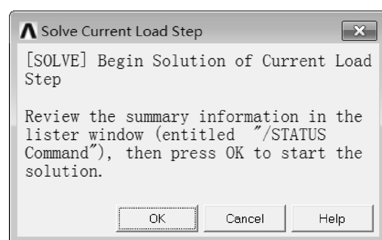


图 8-30　Solve Current Load Step 对话框

同时弹出的还有图 8-30 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

单击 OK 按钮开始求解，当弹出如图 8-31 所示的 Solution is done！提示时，表明求解完成。

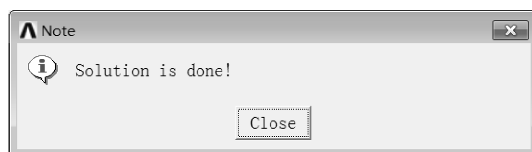


图 8-31　Solution is done！提示

本例也可以使用 APDL 语言进行操作。

```
fini                          !
/cle                          ! 清理工作区

/PREP7                        ! 进入前处理器
ET,1,182                      ! 定义 1 号单元为 PLANE182
ET,2,185                      ! 定义 2 号单元
MP,EX,1,2E11                  ! 定义弹性模量
MP,PRXY,1,0.3                 ! 泊松比

RPR4,6,0,0,0.01               ! 生成六边形
K,7,0,0,0                     ! 定义关键点
K,8,0,0,0.05                  !
```

```
K,9,0,0.1,0.05                              !

LSTR,7,8                                    ! 连线
LSTR,8,9                                    !
LFILLT,7,8,0.015                            ! 生成圆角
LSTR,1,4                                    ! 连线
ASBL,1,10                                   ! 用线切割面

LESIZE,2,,,3                                ! 定义线单元尺寸
LESIZE,3,,,3                                !
LESIZE,4,,,3                                !
LESIZE,7,0.01                               !
LESIZE,8,0.01                               !
LESIZE,9,0.01                               !

MSHAPE,0                                    ! 使用四面形单元
MSHKEY,1                                    ! 使用映射网格
AMESH,ALL                                   ! 划分面单元
VDRAG,ALL,,,,,,7,9,8                        ! 拉伸
ACLEAR,2,3,1                                ! 清除面单元
FINISH                                      !

/SOLU                                       ! 进入求解器
DA,2,ALL                                    ! 约束面
DA,3,ALL                                    !
KSEL,S,,,24,29,1                            ! 选择关键点
FK,ALL,FX,100                               ! 在选中的关键点上施加力
FK,ALL,FZ,20                                !
KSEL,ALL                                    !
SOLVE                                       ! 求解

SAVE                                        ! 保存
FINISH                                      !
```

（16）完成求解后，即可以进入后处理器查看求解的结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape 命令，弹出图 8-32 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

在该对话框中选中 Def + undef edge 单选按钮，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示图 8-33 所示的变形图。

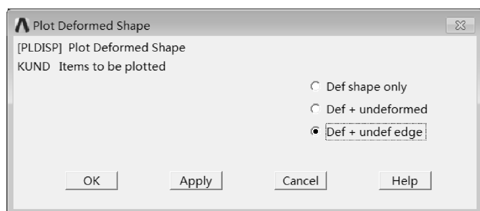


图 8-32　Plot Deformed Shape 对话框

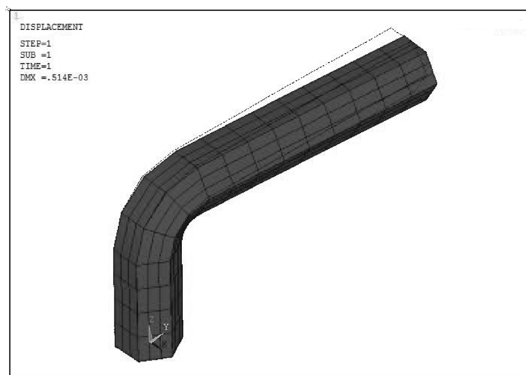


图 8-33　变形图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 8-34 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择 DOF Solution 列表中的 Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中看到位移云图，如图 8-35 所示。

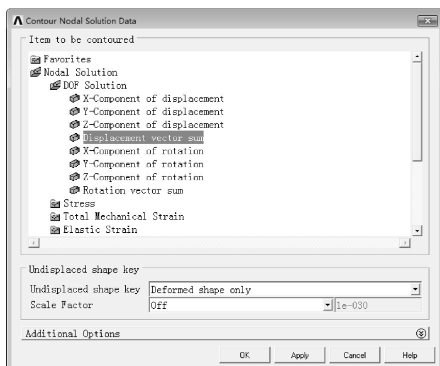


图 8-34　Contour Nodal Solution Data 对话框

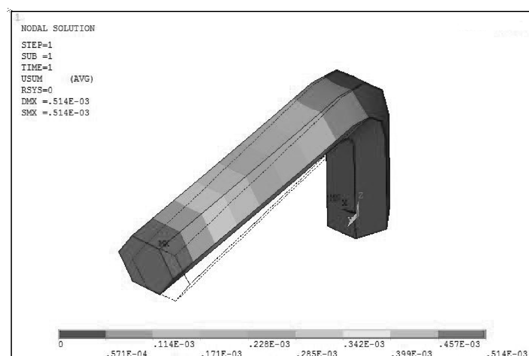


图 8-35　显示位移云图

以同样的方法显示正应力的节点解，如图 8-36 和图 8-37 所示。

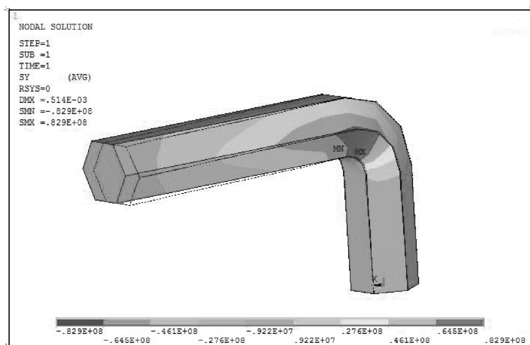


图 8-36　Y 方向应力云图

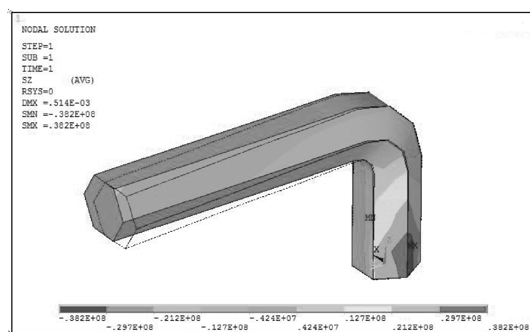


图 8-37　Z 方向应力云图

节点剪应力云图与第 1 主应力云图如图 8-38 和图 8-39 所示。

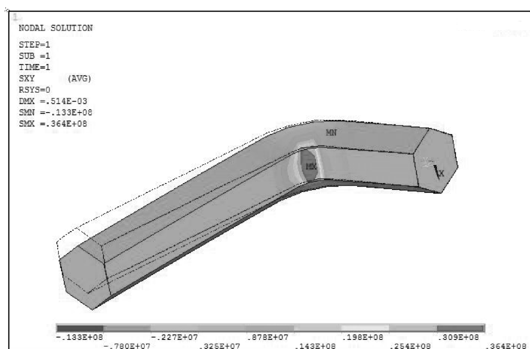


图 8-38　XY 剪应力云图

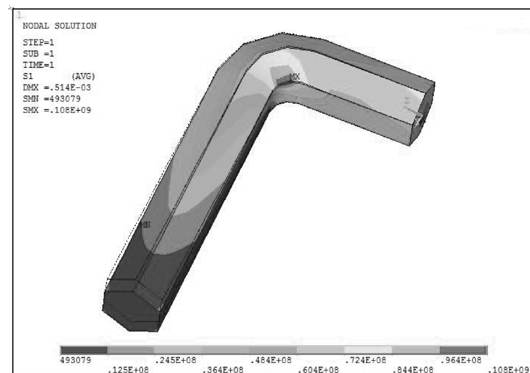


图 8-39　第 1 主应力云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Element Solu，在弹出的对话框中选择单元解的项目，单击 OK 按钮，显示单元解结果如图 8-40 ~ 图 8-43 所示。

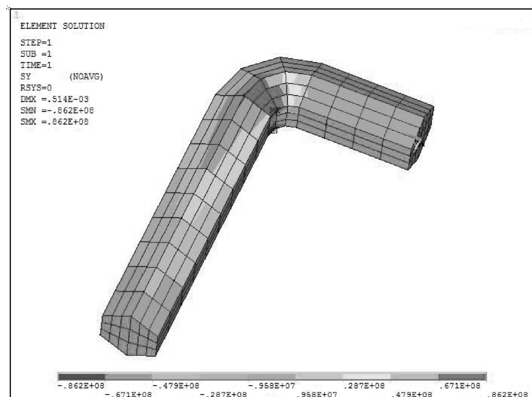


图 8-40　Y 方向单元应力

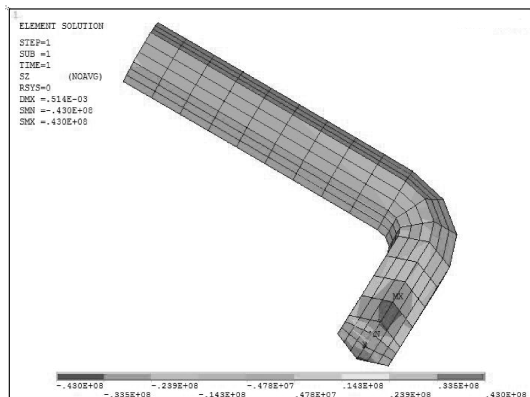


图 8-41　Z 方向单元应力

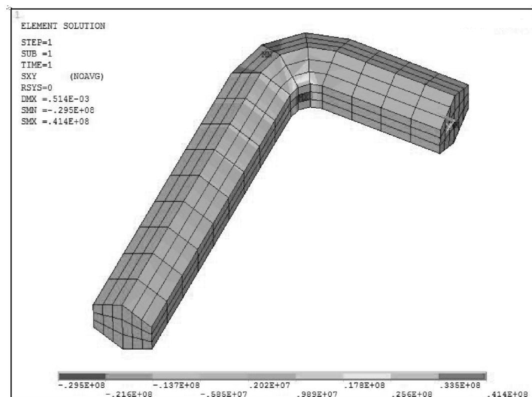


图 8-42　XY 单元剪应力

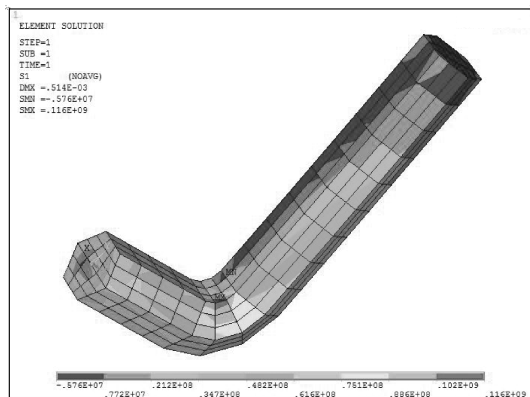


图 8-43　单元第 1 主应力

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined 命令，弹出图 8-44 所示的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框。

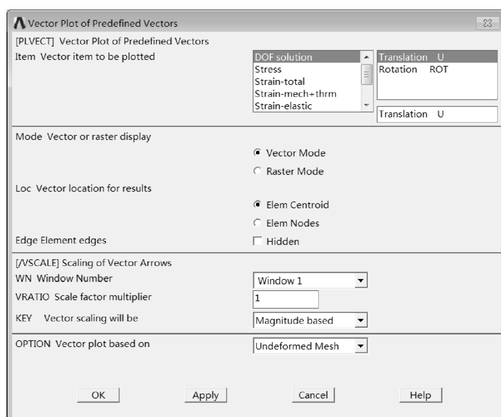


图 8-44　Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

选择显示的矢量为 Translation U，单击 OK 按钮，显示图 8-45 所示的平动矢量；选择显示的矢量为 Rotation ROT，单击 OK 按钮，则显示图 8-46 所示的主应力矢量。

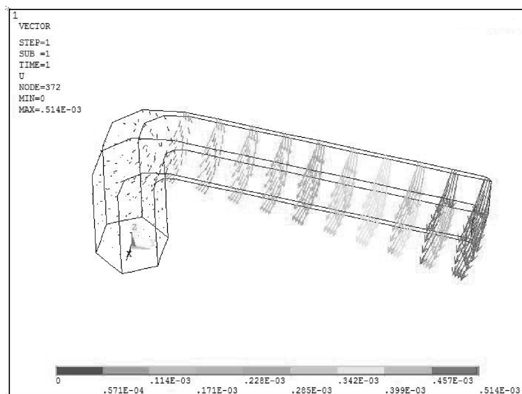


图 8-45　平动矢量

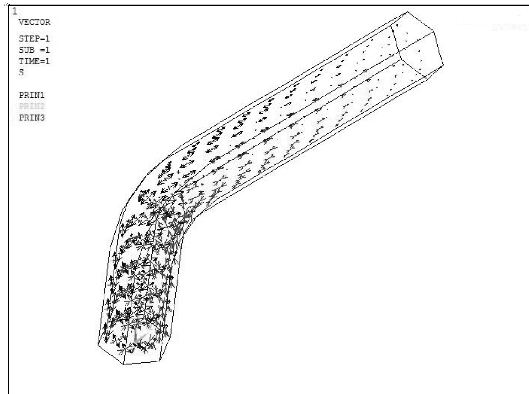


图 8-46　主应力矢量

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Symbols 命令，弹出图 8-47 所示的 Symbols 对话框。

在该对话框中选中 All Reactions 单选按钮，单击 OK 按钮。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot > Elements 命令，在工作区中即可显示图 8-48 所示的约束节点反力。

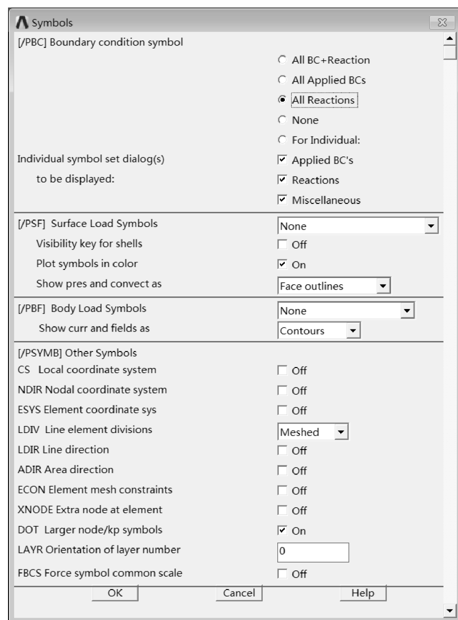


图 8-47　Symbols 对话框

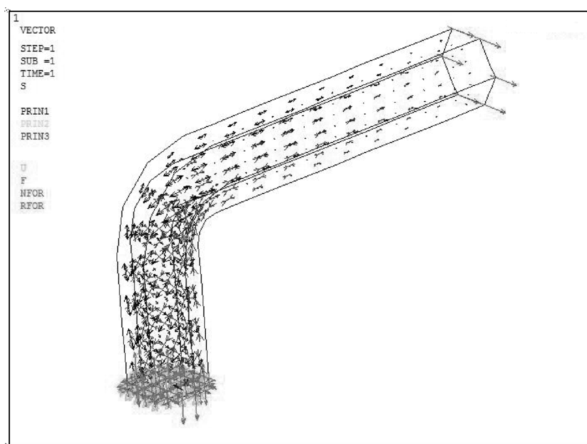


图 8-48　显示应力矢量与约束节点反力

参考上文的介绍，在工作区中显示第 1 主应力节点解的云图。

在 GUI 界面中选择 Menu > General Postproc > Query Results > Subgrid Solu 命令，弹出图 8-49 所示的 Query Subgrid Solution Data 对话框。

在该对话框中选择 Stress > 1st principal S1，单击 OK 按钮，弹出图 8-50 所示的 Query Subgrid Results 对话框。

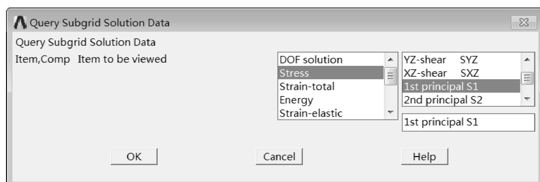


图 8-49　Query Subgrid Solution Data 对话框

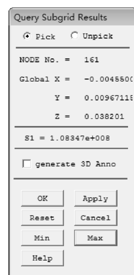


图 8-50　Query Subgrid Results 对话框

单击 Max 按钮，Query Subgrid Results 对话框中即会显示应力最大点的坐标信息，同时该点的应力值也在工作区中被标出，如图 8-51 所示。

（17）单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出图 8-52 所示的 Exit 对话框。

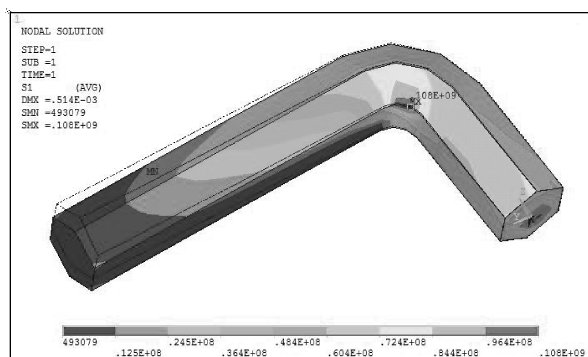


图 8-51　工作区中显示的应力最大点

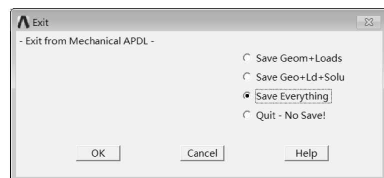


图 8-52　Exit 对话框

选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS。

8.3　桁架结构静力学分析

下面对一空间桁架结构进行静力学分析，同时练习直接建立有限元模型的方法。

8.3.1　问题描述

如图 8-53 所示为一桁架受力简图，各杆件铰接。其中，水平杆弹性模量为 2.2E11 Pa，泊松比为 0.3，杆截面积为 6e－4 m^2，长为 0.4 m；竖直杆弹性模量为 2.0E11 Pa，泊松比为 0.26，杆截面积为 4e－4 m^2，长为 0.3 m；斜边弹性模量为 6.8E10 Pa，截面积为 9E－4 m^2，泊松比为 0.26。水平荷载为 5000 N，竖直荷载为 3000 N。

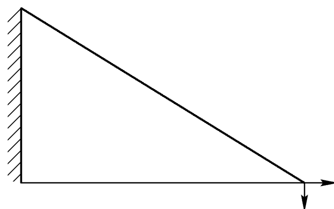


图 8-53　桁架结构简图

8.3.2 问题求解与分析

本例是结构力学中的入门算例，有相关知识基础的读者对这一算例的结果应有一定的定性认识，对于计算结果是否合理易于判断。

本例由杆系组成，这是工程上各种网架结构、桁架结构的共同特点。对于这一类问题，无论其荷载与结构如何复杂，均可按本例思路进行分析。

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，弹出 17.0 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。

在该窗口中依次设置参数 Simulation Evironment、Lisence、Working Directory（工作目录）、Job Name（项目名称），单击 Run 按钮，进入 ANSYS 17.0 GUI 界面。

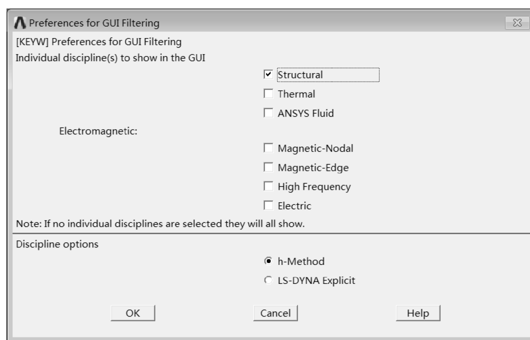


图 8-54 Preferences for GUI Filtering 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preferences 命令，弹出图 8-54 所示的 Preferences for GUI Filtering 对话框。选择分析类型为 Structural，单击 OK 按钮，完成分析环境设置。

（2）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，弹出图 8-55 所示的 Element Types 对话框。单击 Add 按钮，弹出图 8-56 所示的 Library of Element Types 对话框。选择单元类型为 Link > 30finit Stn 180（即 LINK180），单击 OK 按钮，完成单元类型的定义。

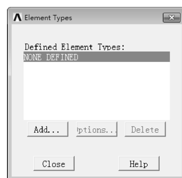


图 8-55 Element Types 对话框

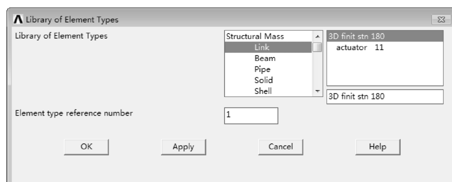


图 8-56 Library of Element Types 对话框

（3）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Other > Real Constants > Add/Edit/Delete 命令，弹出 Real Constants 对话框。单击 Add 按钮，弹出如图 8-57 所示的 Element Type for Real Constants 对话框。选择 Type 1 LINK180，单击 OK 按钮，弹出如图 8-58 所示的 Real Constant Set Number 1, for LINK180 对话框。在该对话框中输入实常数的值，单击 OK 按钮。

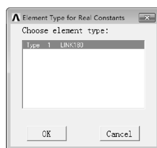


图 8-57 Element Type for Real Constants 对话框

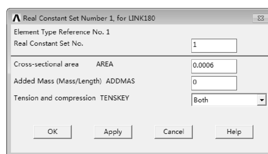


图 8-58 Real Constant Set Number 1, for LINK180 对话框

重述上述实常数的定义过程，定义 2 号实常数值为 9E－4，3 号实常数值为 4E－4。

（4）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出图 8-59 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择材料模型为结构、线性、弹性、各向同性，在弹出的图 8-60 所示 Linear Isotropic Properties for Material Number1（材料 1 参数）对话框中输入 EX＝2E11、PRXY＝0.3，单击 OK 按钮。

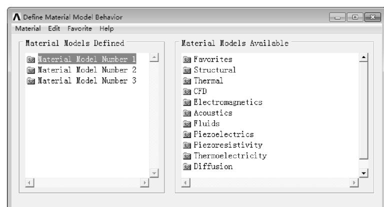


图 8-59　Define Material Model Behavior 对话框

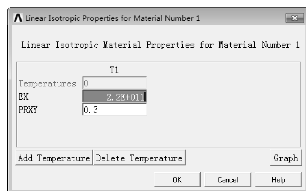


图 8-60　设置材料 1 参数

重复上述定义材料模型的操作，定义 2 号材料为 EX＝6.8E10、PRXY＝0.26，材料 3 为 EX＝2.0E11、PRXY＝0.26，均为线性、弹性、各向同性材料。

（5）完成材料模型定义后，即可以开始建模。本例结构清晰，将直接建立有限元模型。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS 命令，弹出图 8-61 所示的 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，输入节点号 1，其余留空，单击 Apply 按钮。

继续输入节点号 2，设置 X＝0.4，其余空白，单击 Apply 按钮；输入节点号 3，设置 Y＝0.4，单击 OK 按钮。生成的 3 个节点如图 8-62 所示。

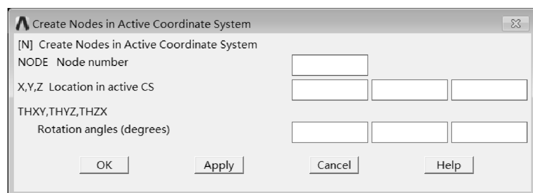


图8-61　Create Nodes in Active Coordinate System 对话框

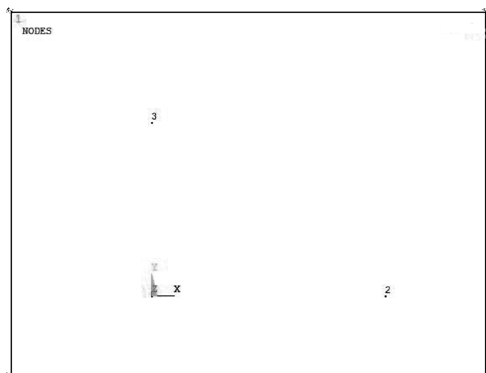


图 8-62　生成节点

（6）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs 命令，弹出图 8-63 所示的 Meshing Arributes 对话框，设置材料编号为 1，实常数号为 1，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes 命令，拾取 1、2 号关键点，单击 OK 按钮，生成第 1 个单元。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs 命令，在弹出的 Meshing Arributes 对话框中设置材料编号为 2，实常数号为 2，单击 OK

按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes 命令，拾取 2、3 号关键点，单击 OK 按钮，生成第 2 个单元。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs 命令，在弹出的 Meshing Attributes 对话框中设置材料编号为 3，实常数号为 3，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes 命令，拾取 3、1 号关键点，单击 OK 按钮，生成第 3 个单元。生成的单元如图 8-64 所示。

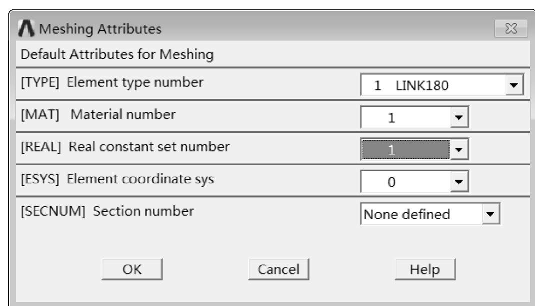


图 8-63　Meshing Attributes 对话框

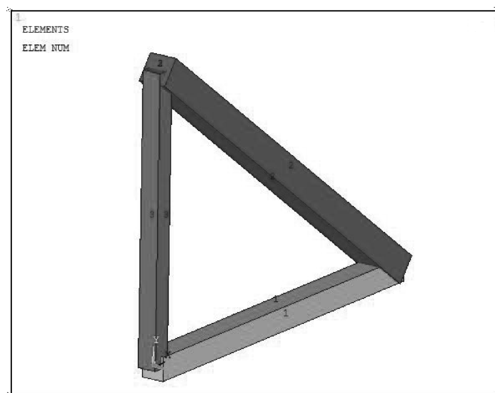


图 8-64　生成单元

（7）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 8-65 所示的 New Analysis 对话框。选择分析类型为 Static，即静态分析，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，拾取 1 号关键点，单击 OK 按钮，弹出图 8-66 所示的 Apply U,ROT on Nodes 对话框，选择要约束的自由度为 All DOF，单击 OK 按钮。

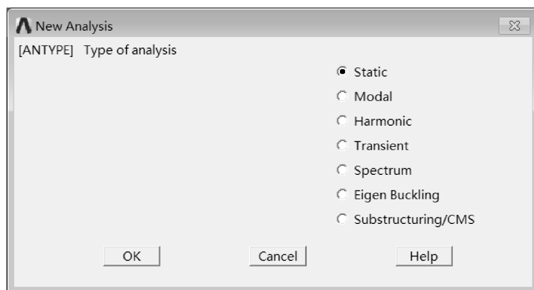


图 8-65　New Analysis 对话框

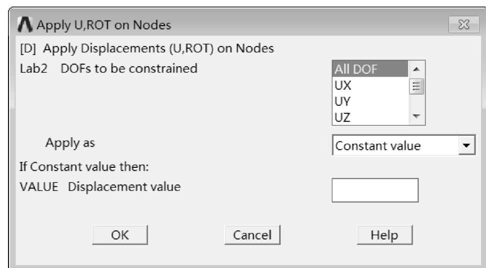
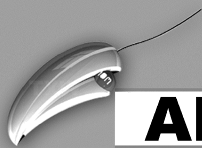


图 8-66　Apply U,ROT on Nodes 对话框

请读者自行重复上述操作，约束 3 号关键点的全部自由度。完成约束应如图 8-67 所示。

以上约束过程也可以直接在选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis 命令后一次性拾取两个节点，不需要分开两次定义，此处只是为了让读者自



行练习。

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes 命令，拾取 2 号节点，单击 OK 按钮，弹出图 8-68 所示的 Apply F/M on Nodes 对话框。

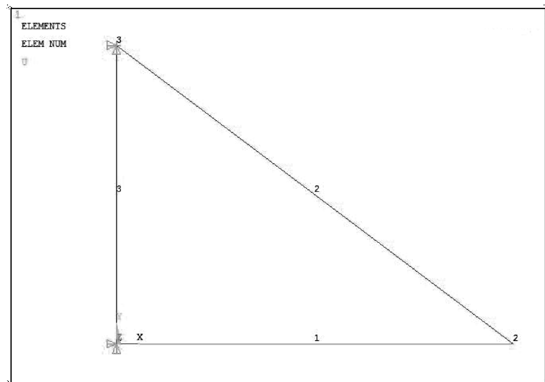


图 8-67 完成约束

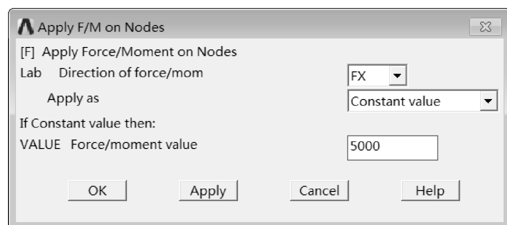


图 8-68 Apply F/M on Nodes 对话框

选择加载方向为 FX，值为 5000，单击 OK 按钮，施加荷载如图 8-69 所示。

重复上述操作，在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force / Moment > On Nodes 命令，拾取 2 号节点，单击 OK 按钮，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框。

选择加载方向为 FY，值为 -3000，单击 OK 按钮，施加荷载如图 8-70 所示。

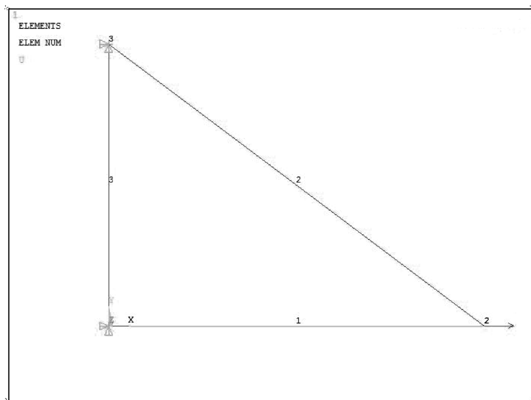


图 8-69 施加水平荷载

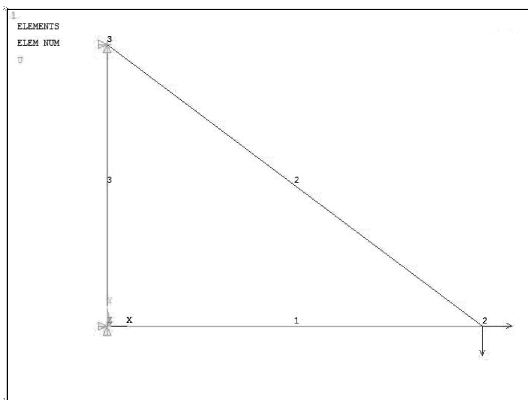


图 8-70 施加竖直荷载

（9）完成了建模、划分网格、施加荷载，计算前的准备工作已做好，下一步即可进行求解。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，弹出图 8-71 所示的/STATUS Command 窗口，其中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 8-72 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明求解完成。

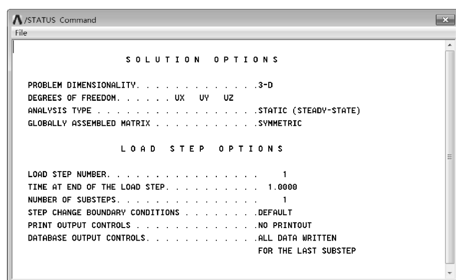


图 8-71 /STATUS Command 窗口

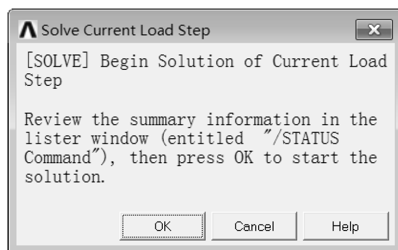


图 8-72 Solve Current Load Step 对话框

本例也可使用命令流进行求解。

```
fini                          !
/cle                          ! 清理工作区

/prep7                        ! 进入前处理器
et,1,180                      ! 选择 LINK180 单元

r,1,6e-4                      ! 定义 3 组实常数
r,2,9e-4                      !
r,3,4e-4                      !

mp,ex,1,2.2e11                ! 定义 3 组材料参数
mp,prxy,1,0.3                 !
mp,ex,2,6.8e10                !
mp,prxy,2,0.26                !
mp,ex,3,2.0e11                !
mp,prxy,3,0.26                !

n,1,,,,                       ! 定义 1 号节点
n,2,0.4,0,0                   ! 定义 2 号节点
n,3,0,0.3,0                   ! 定义 3 号节点

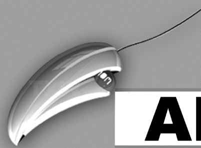
mat,1                         ! 选择 1 号材料
real,1                        ! 选择 1 号实常数
e,1,2                         ! 连接 1、2 号节点

mat,2                         !
real,2                        !
e,2,3                         !

mat,3                         !
real,3                        !
e,3,1                         !
                              !
/solu                         ! 进入求解器
antype,static                 ! 选择静态分析
d,1,all                       ! 约束 1 号节点
d,3,all                       !
f,2,fx,5000                   ! 施加水平荷载
f,2,fy,-3000                  ! 施加竖直荷载
solve                         ! 求解
fini                          !
```

（10）完成求解后，即可进入通用后处理器进行处理分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape 命令，弹



出图 8-73 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

在该对话框中选中 Def + undef edge 单选按钮，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示图 8-74 所示的变形图。

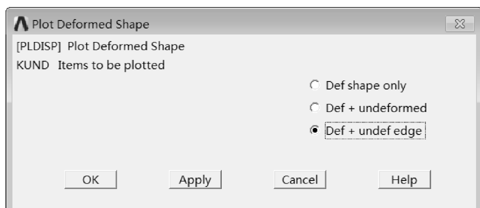


图 8-73 Plot Deformed Shape 对话框

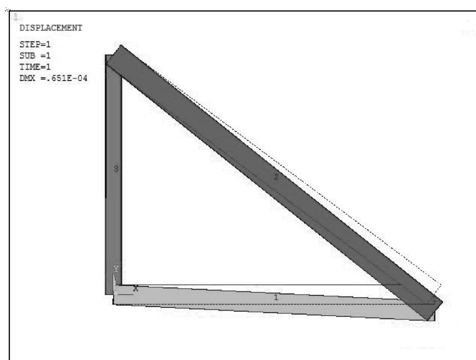


图 8-74 变形图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 8-75 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择 DOF Solution 列表中的 Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示位移云图，如图 8-76 所示。以同样的方法显示项目的节点解，如图 8-77～图 8-80 所示。

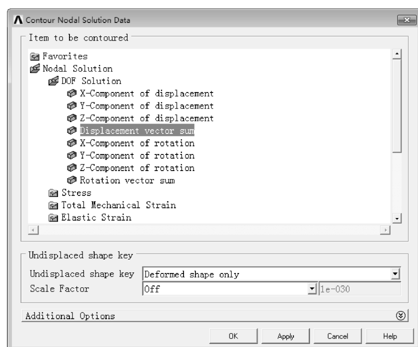


图 8-75 Contour Nodal Solution Data 对话框

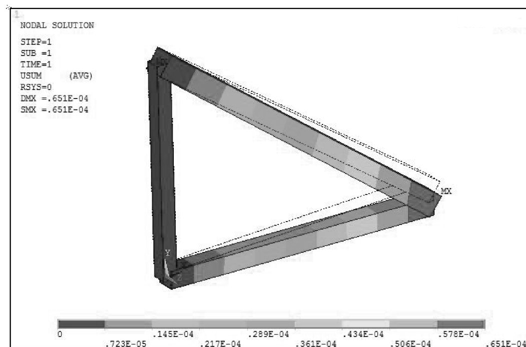


图 8-76 显示位移

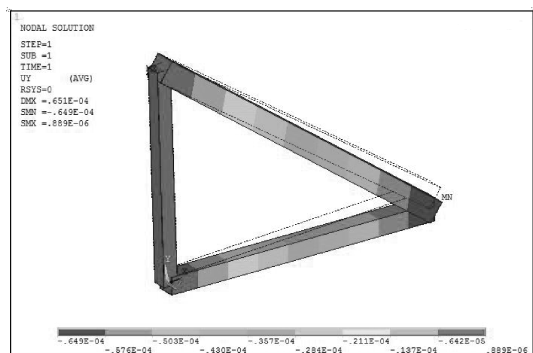


图 8-77 Y 方向位移云图

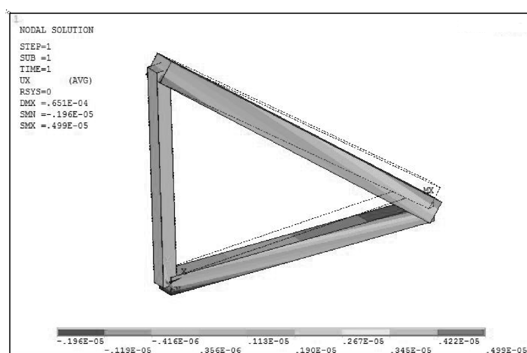


图 8-78 X 方向位移云图

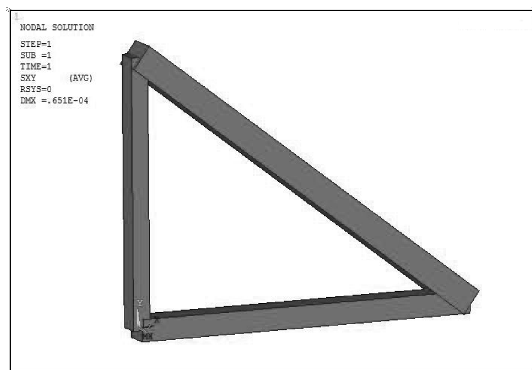


图 8-79 XY 剪应力云图

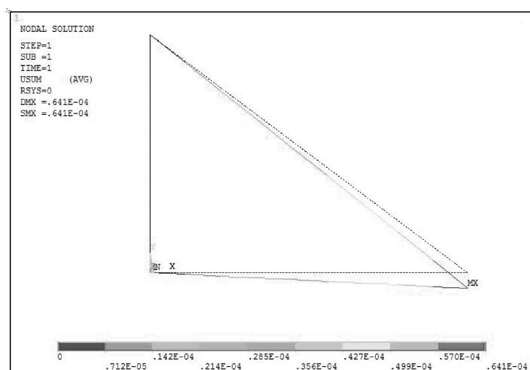


图 8-80 节点位移

（11）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Element Solu，在弹出的对话框中选择单元解的项目，单击 OK 按钮，显示单元解结果如图 8-81 和图 8-82 所示。

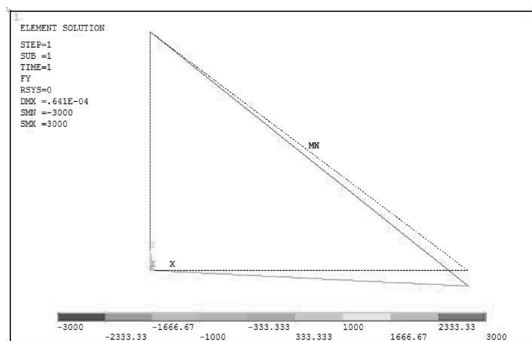


图 8-81 Y 方向单元轴力

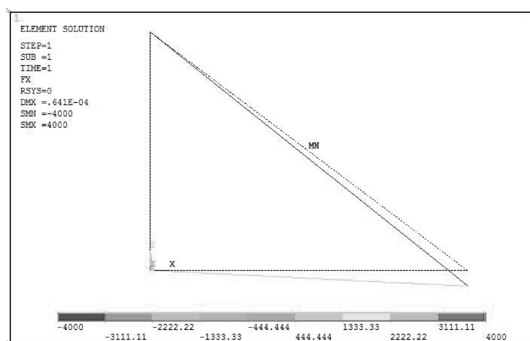


图 8-82 X 方向单元应力

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined 命令，弹出图 8-83 所示的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框。

选择显示的矢量为 Translation U，单击 OK 按钮，则显示图 8-84 所示的平动矢量。

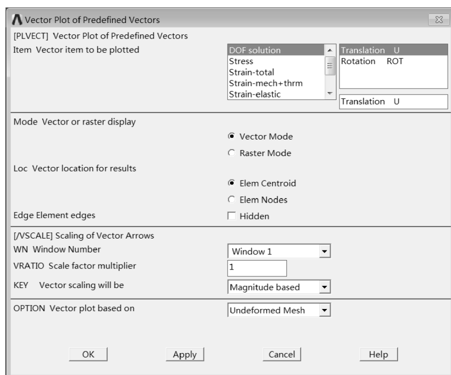


图 8-83 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

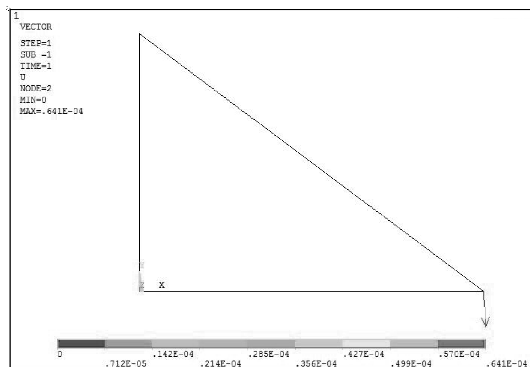


图 8-84 平动矢量

（12）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Symbols 命令，弹出图 8-85 所示的 Symbols 对话框。

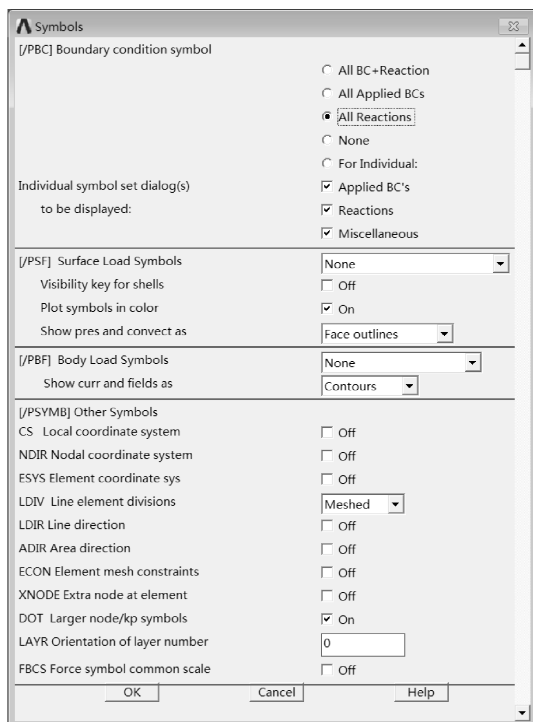


图 8-85 Symbols 对话框

在该对话框中选中 All Reactions 单选按钮，单击 OK 按钮。在 GUIL 界面中选择 Utility Menu > Plot > Elements 命令，在工作区中即可显示图 8-86 与图 8-87 所示的约束节点反力。

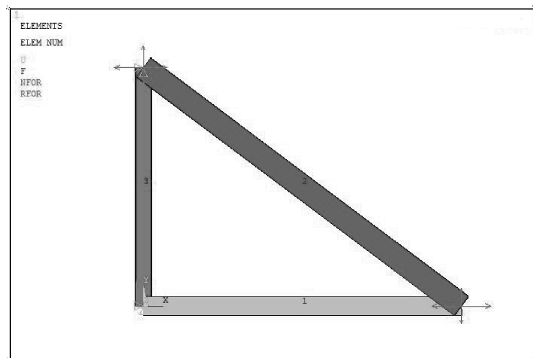


图 8-86 显示约束节点反力

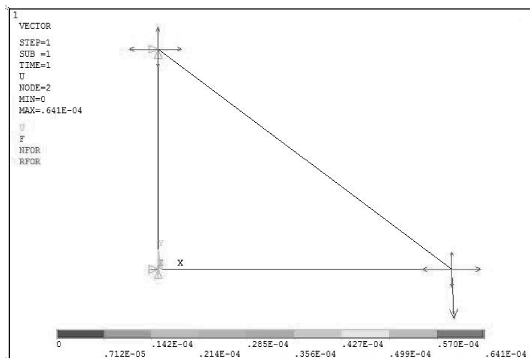


图 8-87 显示约束节点反力

(13) 单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出图 8-88 所示的 Exit 对话框。

选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS。

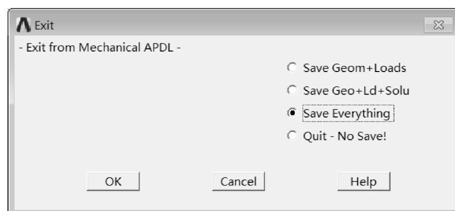


图 8-88 Exit 对话框

8.4 高压气罐静力学分析

8.4.1 问题描述

某高压气罐设计压力 P = 16 MPa，设计温度 T = 200℃，材料为 16MnR。筒体内径 R1 = 775 mm，壁厚 t1 = 100 mm；封头内径 R2 = 800 mm，厚度 t2 = 48 mm。筒体削边长度 L = 95 mm，筒体长度 LC = 1200 mm。几何形状如图 8-89 所示。试对该高压气罐筒体与封头的连接区域进行应力分析。



图 8-89　高压气罐几何模型

8.4.2 问题求解与分析

由于主要讨论封头与筒体过渡区域的应力状况，因此忽略封头上的其他结构（如开孔接管等），有限元计算采用 PLANE183 单元，并设定轴对称选项。筒体下端各节点约束轴向位移，球壳对称面上各节点约束水平方向位移，内壁施加均匀压力面荷载。

PLANE183 是高阶二维 8 节点单元。该单元具有二次位移函数，适于生成不规则网格模型（如各种 CAD/CAM 系统生成的模型）。PLANE183 由 8 个节点定义，每个节点有 2 个自由度，即沿节点坐标系 X、Y 方向的平动。该单元可用作平面单元或轴对称单元。该单元具有塑性、蠕变、应力刚化、大变形以及大应变等功能，也可利用混合公式模拟接近不可压缩的弹塑性材料的变形。

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，弹出 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。

在该窗口中依次设置参数 Simulation Environment、Lisence、Working Directory（工作目录）和 Job Name（项目名称），单击 Run 按钮，进入 ANSYS 17.0 GUI 界面。

在 GUI 界面中选择 main menu > Preferences 命令，弹出图 8-90 所示的 Preferences for GUI Filtering 对话框。选择分析类型为 Structural，单击 OK 按钮，完成分析环境设置。

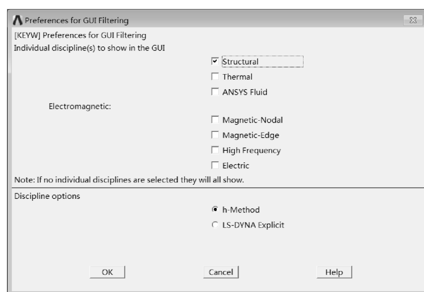


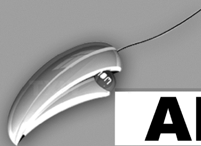
图 8-90　Preferences for GUI Filtering 对话框

（2）PLANE183 可以通过 APDL 命令流调用。在命令输入框中输入如下命令并执行。

```
ET,1,183
```

此时在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的 Element Types 对话框中即可看到完成添加的单元，如图 8-91 所示。

（3）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters 命令，弹出 Scalar



Parametevs 对话框。

在该对话框中，设置 R1 = 775、T1 = 100、R2 = 800、T2 = 48、L = 95、LC = 1200、P = 16、E = 2E5、NU = 0.3、NT = 5、NS = 30、NC = 30、NL = 5、RA = 0.6，如图 8-92 所示。

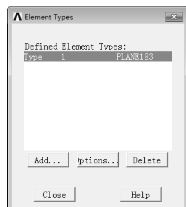


图 8-91 Element Types 对话框

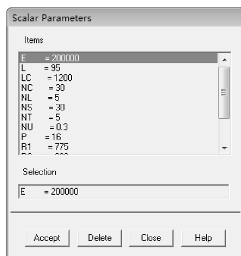


图 8-92 Scalar Parameters 对话框

（4）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出图 8-93 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择材料模型为结构、线性、弹性、各向同性，弹出图 8-94 所示 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框。

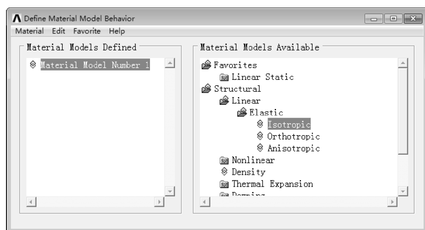


图 8-93 Define Material Model Behavior 对话框

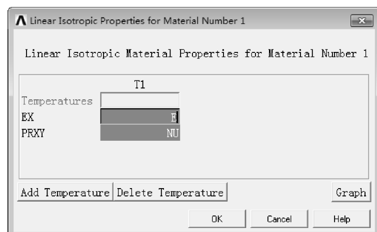


图 8-94 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

在该对话框中设置 EX = E，PRXY = NU，单击 OK 按钮。关闭图 8-93 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。至此完成单元与材料参数定义。

（5）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Circle > Partial Annulu 命令，弹出图 8-95 所示的 Part Annular Circ Area 对话框。

在该对话框中设置参数后，单击 OK 按钮，在工作区中生成 1/4 圆环，如图 8-96 所示。

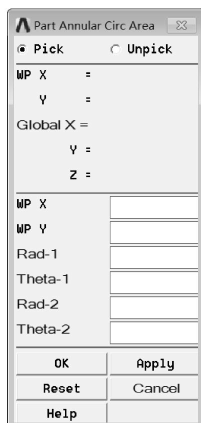


图 8-95 Part Annular Circ Area 对话框

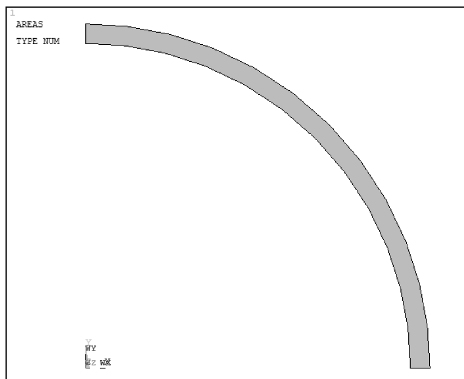


图 8-96 生成 1/4 圆环

（6）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By 2 Corners 命令，弹出图 8-97 所示的 Rectangle by 2 Corners 对话框。

在该对话框中设置参数后，单击 OK 按钮，在工作区中即可看到新生成的矩形，如图 8-98 所示。

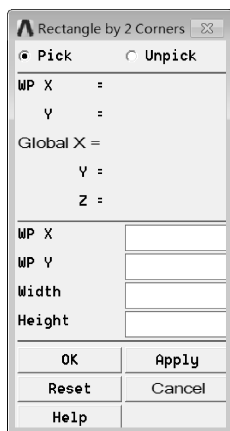


图 8-97　Rectangle by 2Corners 对话框

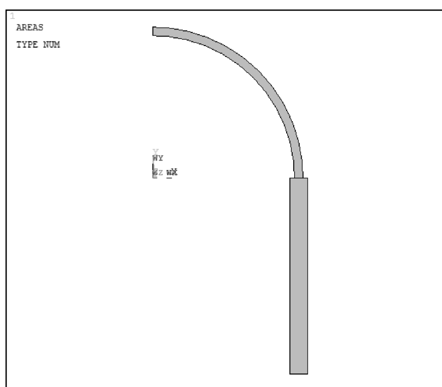


图 8-98　生成矩形

（7）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > WorkPlane > Offset WP by Increments 命令，弹出图 8-99 所示的 Offset WP 对话框，在 XY，YZ，ZX Angles 框中输入转动角度 90，单击 Z - 按钮。

删除转角，在 X，Y，Z Offsets（平移）框中输入 L，单击平移的 Z + 按钮。此时工作平面的位置如图 8-100 所示。

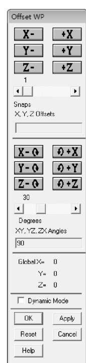


图 8-99　Offset WP 对话框

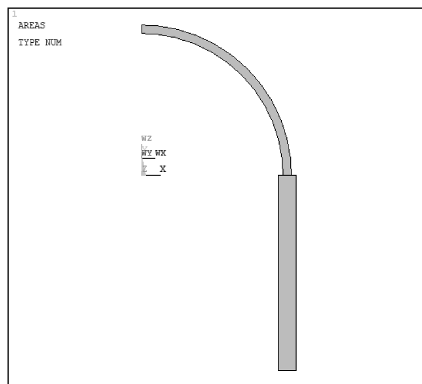
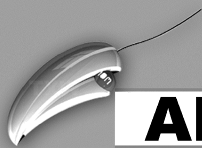


图 8-100　移动工作平面

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，弹出图 8-101 所示的 Select Entities 对话框。定义选择对象为 Areas，选择方式为 By Num/Pick，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮，弹出图 8-102 所示的 Select areas 对话框。

在工作区中拾取 1/4 圆环（见图 8-103），单击 OK 按钮。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Area by Work Plane 命令，弹出 Divide Area by Work Plane 对话框。拾取工作区中的圆环（见图 8-104），单击 OK 按钮，完成划分后如图 8-105 所示（注意下部多出的线）。



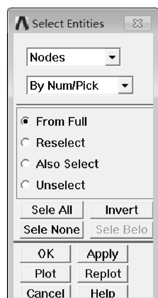


图 8-101 Select Entities 对话框

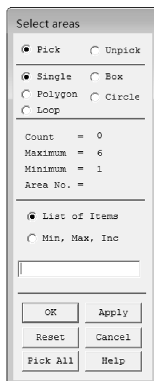


图 8-102 Select areas 对话框

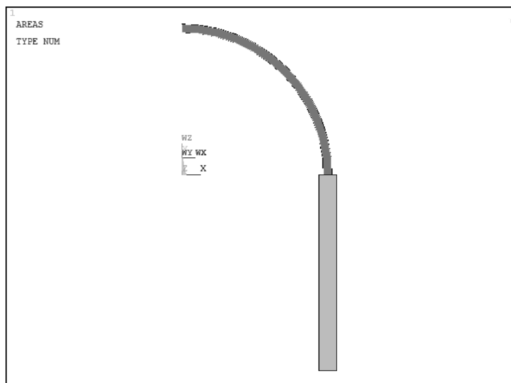


图 8-103 拾取 1/4 圆环

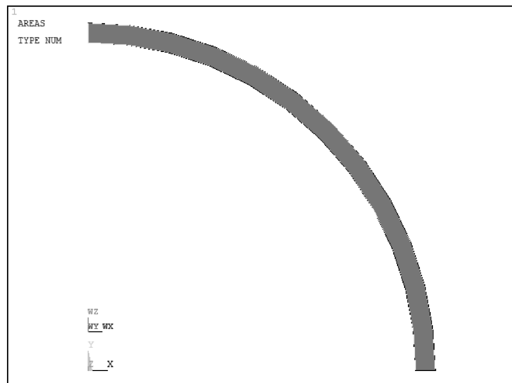


图 8-104 拾取划分对象

参考上面的方法，选择新分割出的一段圆环，如图 8-106 所示。

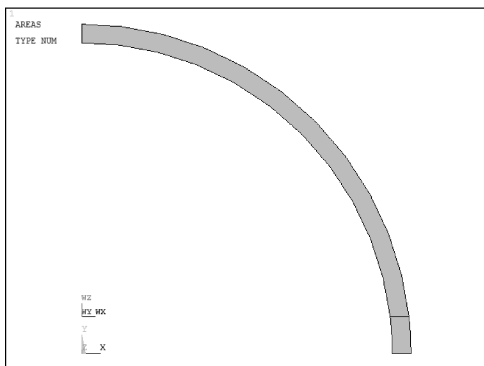


图 8-105 划分后效果

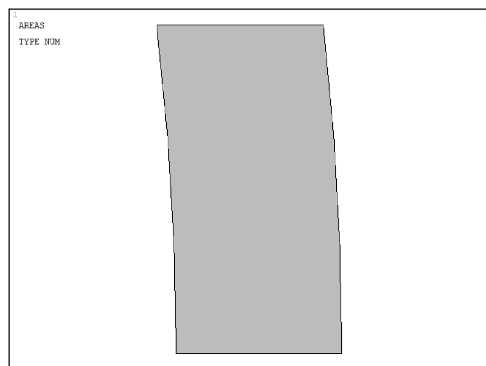


图 8-106 选中新分割出的一段圆环

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Area and Below 命令，弹出 Delete Area and Below 对话框。选中图 8-106 所示的图形，单击 OK 按钮。至此模型如图 8-107 所示。

（9）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs 命令，弹出 Create Area thru KPs 对话框。

拾取图 8-108 所示的关键点，单击 OK 按钮，完成模型的建立。完整的模型如图 8-109 所示。

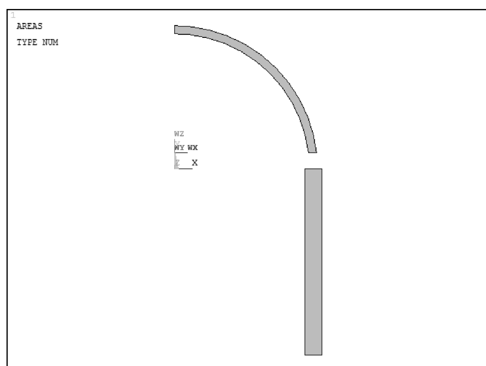


图 8-107　删除多余部分

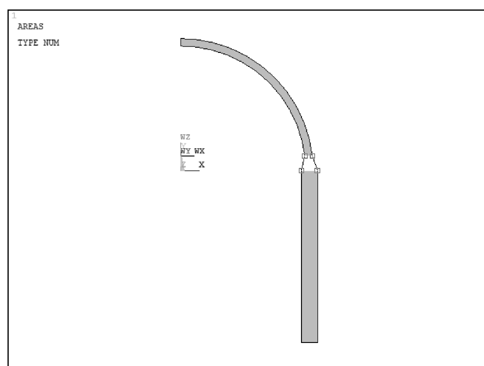


图 8-108　拾取围成面的关键点

（10）几何模型必须进行网格划分，转换成有限元模型后才能进行分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool 命令，弹出 Mesh Tool 对话框。在该对话框中，单击 Size Controls 选项组中 Global 右侧的 Set 按钮，弹出图 8-110 所示的 Global Element Sizes 对话框。

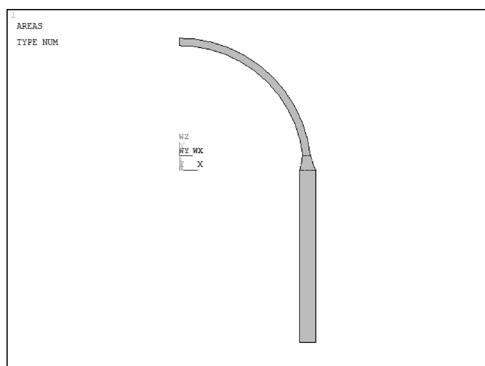


图 8-109　完整模型

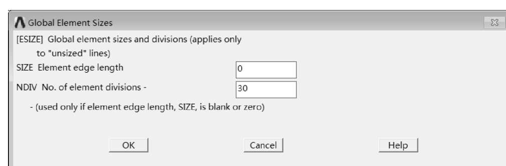


图 8-110　Global Element Sizes 对话框

在 NDIV No. of element divisions 框中输入 30，即设置线被分为 30，单击 OK 按钮。在 MeshTool 对话框中单击 Mesh 按钮，弹出 Mesh Areas 对话框。

选中工作区中的几何模型（见图 8-111），单击 OK 按钮。完成网格划分后如图 8-112 所示。

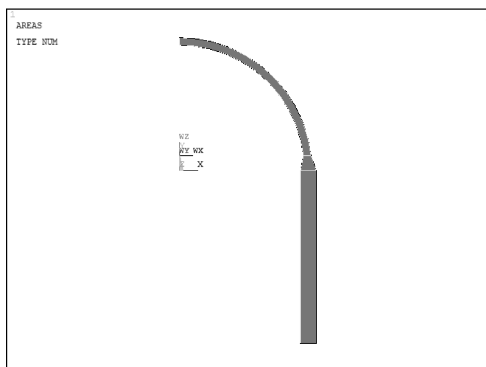


图 8-111　选中几何模型

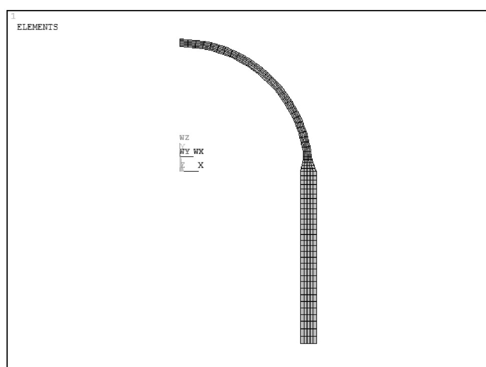


图 8-112　完成网格划分

（11）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，弹出图 8-113 所示的 Select Entities 对话框。

在选择对象下拉列表框中选择 Lines，在选择方式下拉列表框中选择 By Num/pick，选中 From Full 单选按钮，单击 Apply 按钮，弹出 Select lines 对话框。

在工作区中选择模型的下边缘，如图 8-114 所示。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot > Lines 命令，显示选中的线，如图 8-115 所示。



图 8-113　Select Entities 对话框

回到图 8-113 所示的 Select Entities 对话框，将选择对象改为 Nodes，选择方式改为 Attached to，其他设置如图 8-116 所示，单击 OK 按钮，完成节点选择。

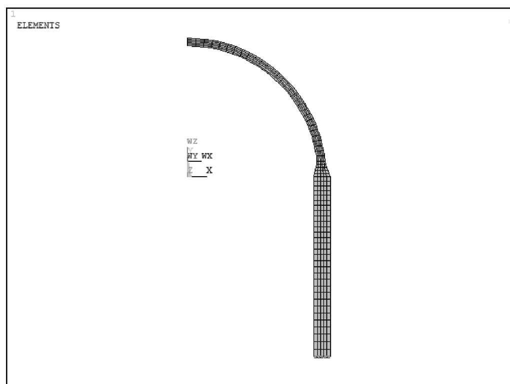


图 8-114　选中下边缘

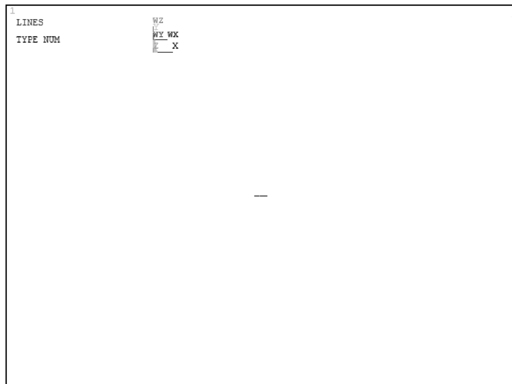


图 8-115　选中的线

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot > Nodes 命令，显示选中的节点，如图 8-117 所示。

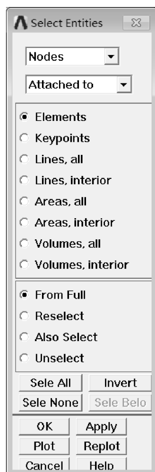


图 8-116　Select Entities 对话框

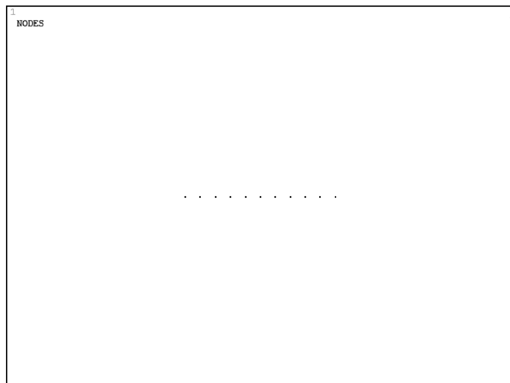


图 8-117　选中的节点

（12）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structual > Displacement > On Nodes 命令，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框。

将选择方式改为 Box，框选工作区中的所有节点，如图 8-118 所示。单击 OK 按钮，弹出如图 8-119 所示的 Apply U,ROT on Nodes 对话框。选择 UY，单击 OK 按钮，完成底边约束，如图 8-120 所示。

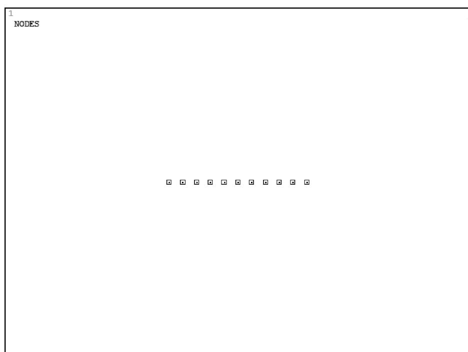


图 8-118　选中的节点

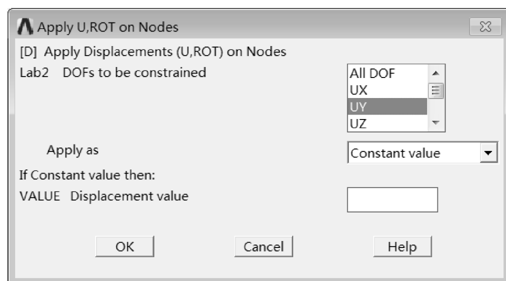


图 8-119　Apply U,ROT on Nodes 对话框

（13）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，弹出图 8-121 所示的 Select Entities 对话框。

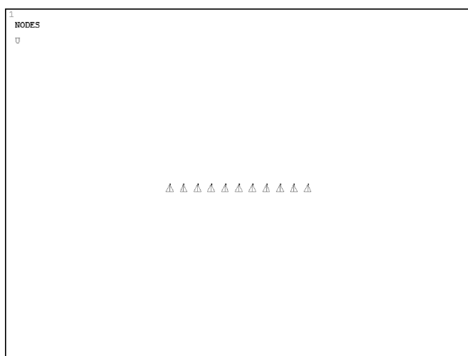


图 8-120　底边固定约束

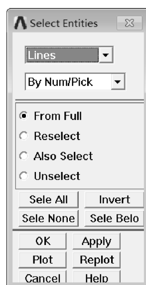


图 8-121　Select Entities 对话框

在该对话框中设置选择对象为 Lines，选择方式为 By Num/Pick，选中 From Full 单选按钮，单击 Apply 按钮，弹出 Select lines 对话框。

在工作区中选择模型的上部侧边，如图 8-122 所示。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot > Lines 命令，显示选中的线，如图 8-123 所示。

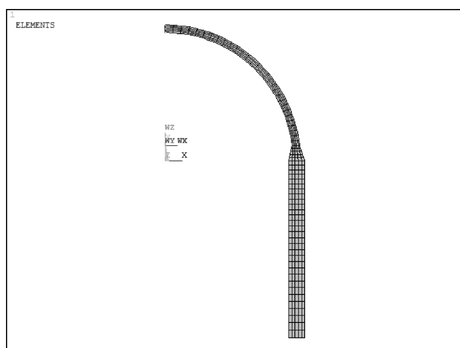


图 8-122　选中内边缘

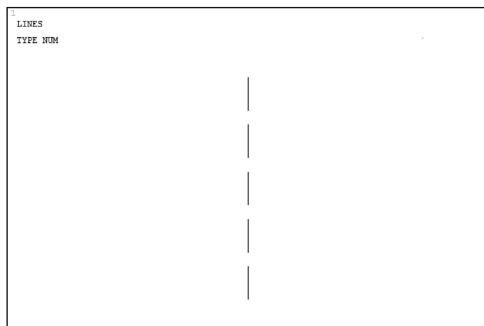


图 8-123　选中的线

回到图 8-121 所示的 Select Entities 对话框，将选择对象改为 Nodes，选择方式改为 Attached to，其他设置如图 8-124 所示，单击 OK 按钮，完成节点选择。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot > Nodes 命令，显示选中的节点，如图 8-125 所示。

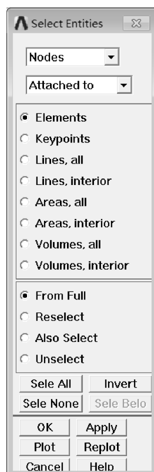


图 8-124 Select Entities 对话框

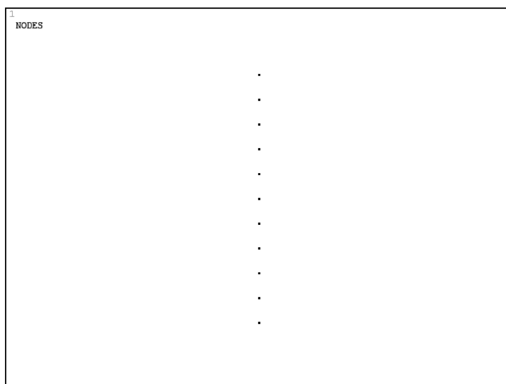


图 8-125 选中的节点

（14）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structual > Displacement > On Nodes 命令，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框。将选择方式改为 Box，框选工作区中的所有节点，单击 OK 按钮，弹出图 8-126 所示的 Apply U,ROT on Nodes 对话框。

选择 UX，单击 OK 按钮，完成约束后如图 8-127 所示。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot > Lines 命令，显示模型的线框，如图 8-128 所示。

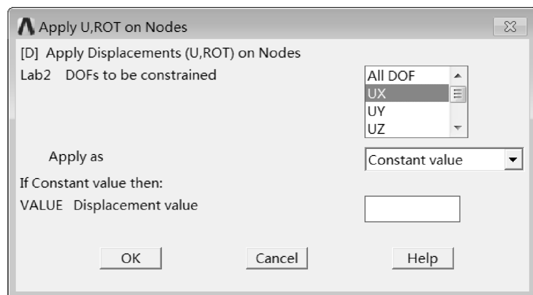


图 8-126 Apply U,ROT on Nodes 对话框

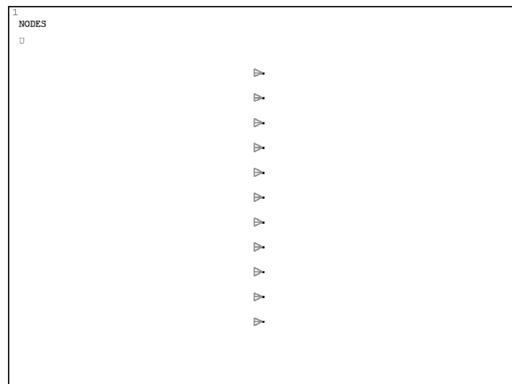


图 8-127 底边固定约束

（15）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，弹出图 8-129 所示的 Select Entities 对话框。设置选择对象为 Lines，选择方式为 By Num/Pick，单击 OK 按钮。选择图 8-128 所示的线框模型的内边（见图 8-130），单击 OK 按钮，在工作区中显示为图 8-131 所示。

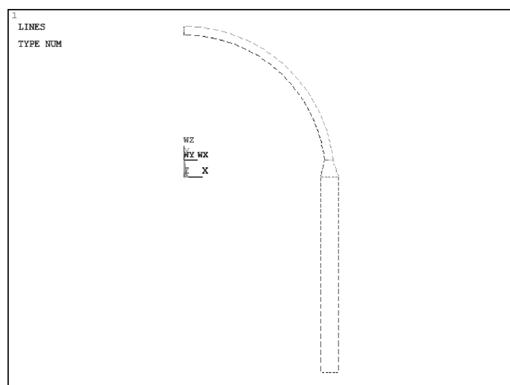


图 8-128　显示线框

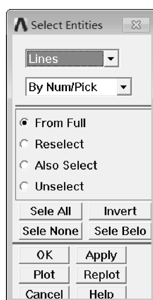


图 8-129　Select Entities 对话框

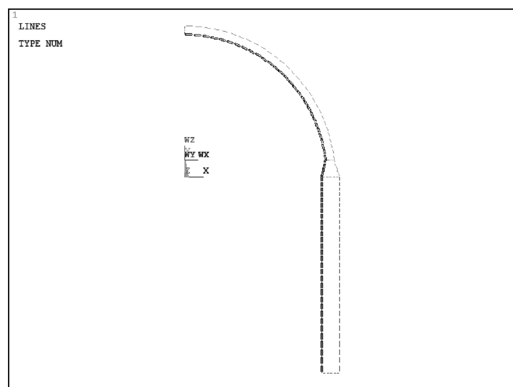


图 8-130　选中的边

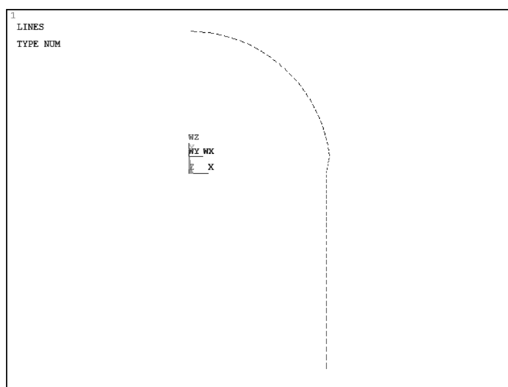


图 8-131　仅显示选中的边

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，弹出图 8-132 所示的 Select Entities 对话框，设置选择对象为 Nodes，选择方式为 Attached to，目标为 Lines all，单击 OK 按钮，选中的节点如图 8-133 示。

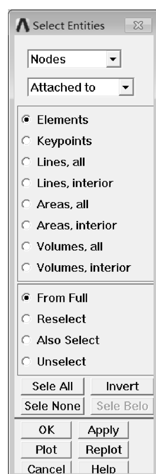


图 8-132　Select Entities 对话框

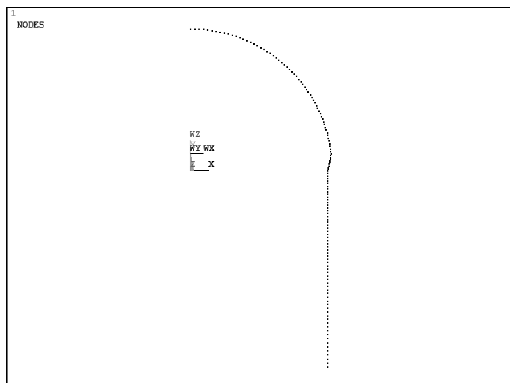
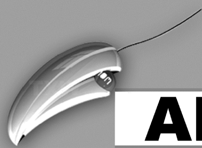


图 8-133　选中的节点



（16）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Nodes 命令，弹出 Apply PRES on nodes 对话框。

单击 Pick All 按钮，再单击 OK 按钮，弹出图 8-134 所示的 Apply PRES on nodes 对话框。在 VALUE Load PRES value 框中输入 P，单击 OK 按钮。

此时，完成边界条件定义的模型如图 8-135 所示。

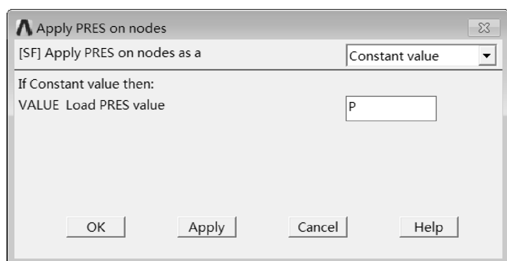


图 8-134 Apply PRES on nodes 对话框

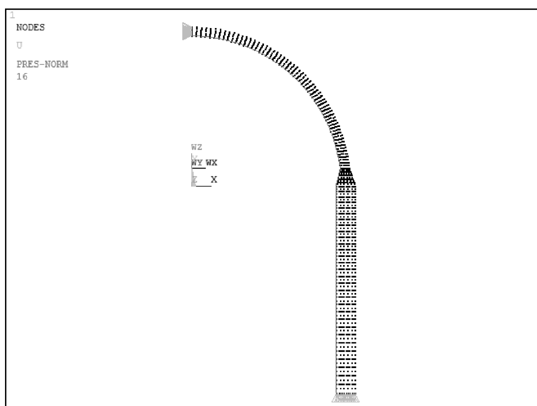


图 8-135 完成边界条件定义

（17）完成了建模、划分网格、施加边界条件，计算前的准备工作已做好，下一步即可进行求解。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，弹出图 8-136 所示的 /STATUS Command 窗口，其中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 8-137 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

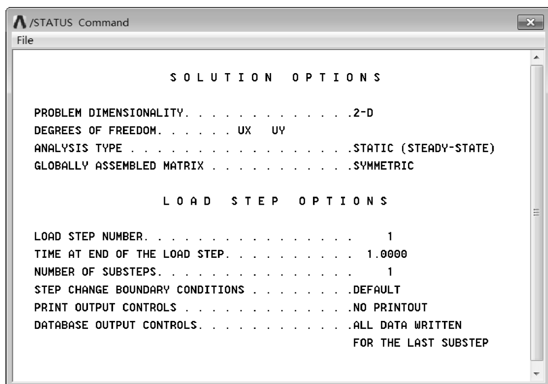


图 8-136 /STATUS Command 窗口

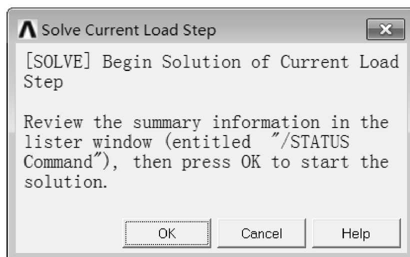


图 8-137 Solve Current Load Step 对话框

单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明求解完成。

本例使用命令流求解如下。



```
FINI                                    !
/CLE                                    ! 清理工作区
R1 = 775                                ! 定义参数
T1 = 100                                !
R2 = 800                                !
T2 = 48                                 !
L = 95                                  !
LC = 1200                               !
P = 16                                  !
E = 2E5                                 !
NU = 0.3                                !
NT = 5                                  ! 厚度方向剖分数
NS = 30                                 ! 球壳径向剖分数
NC = 30                                 ! 筒体轴向剖分数
NL = 5                                  ! 过渡段剖分数
RA = 0.6                                ! 剖分比例
/PREP7                                  ! 进入前处理器
et,1,82                                 ! 使用183号单元
keyopt,1,3,1                            ! 定义单元选项
mp,ex,1,E                               ! 材料参数
mp,nuxy,1,NU                            !
cyl4,,,R2,0,R2+T2,90                    ! 四分之一圆环
blc4,R1,0,T1,-LC+L                      ! 矩形
WPROT,,-90                              ! 旋转工作平面
WPOFF,,,L                               ! 平移工作平面
ASEL,S,LOC,Y,0,R2+T2                    !
ASBW,ALL                                ! 切割
ASEL,S,LOC,Y,0,L                        !
ADELE,ALL,,,1                           ! 删除面
K1 = KP(R1,0,0)                         ! 定义关键点
K2 = KP(R1+T1,0,0)                      !
KSEL,S,LOC,Y,L                          !
*GET,K3,KP,,NUM,MIN                     ! 获取最小关键点号
*GET,K4,KP,,NUM,MAX                     ! 获取最大关键点号
ALLS                                    !
A,K1,K2,K3,K4                           ! 使用关键点生成面
LSEL,S,LOC,Y,-LC+L                      ! 选择线
LSEL,A,LOC,Y,0                          !
LSEL,A,LOC,Y,L                          !
LSEL,A,LOC,X,0                          !
LESIZE,ALL,,,NT,,,,,1                   ! 定义线单元尺寸
LSEL,S,LENGTH,,LC-L                     !
LSEL,R,LOC,X,R1                         !
LESIZE,ALL,,,NC,1/RA,,,,1               !
LSEL,S,LENGTH,,LC-L                     !
LSEL,R,LOC,X,R1+T1                      !
LESIZE,ALL,,,NC,RA,,,,1                 !
LSEL,S,RADIUS,,R2                       !
LSEL,A,RADIUS,,R2+T2                    !
LESIZE,ALL,,,NS,RA,,,,1                 !
LSEL,S,LOC,Y,0,L                        !
LSEL,U,LOC,Y,0                          !
LSEL,U,LOC,Y,L                          !
LESIZE,ALL,,,NL,,,,,1                   !
ALLS                                    !
AMESH,ALL                               ! 划分网格
FINI                                    !
/SOLU                                   ! 进入求解器
NSEL,S,LOC,Y,-LC+L                      ! 选择底面节点
```

```
D,ALL,UY                                    ! 约束自由度
NSEL,S,LOC,X,0                              !
D,ALL,UX                                    !
LSEL,S,LINE,,3,8,5                          !
LSEL,A,LINE,,10                             !
NSLL,S,1                                    !
SF,ALL,PRES,P                               ! 在线上施加均匀面荷载
ALLS                                        !
SOLVE                                       ! 求解
FINI                                        !
```

（18）完成求解后，即可进入通用后处理器进行处理分析。在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape 命令，弹出图 8-138 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

在该对话框中选中 Def + undef edge 单选按钮，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示图 8-139 所示的变形图。

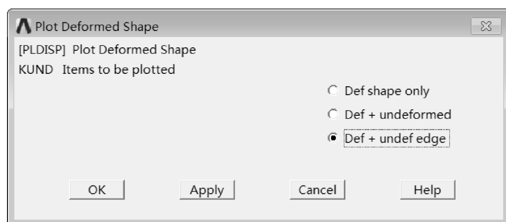


图 8-138　Plot Deformed Shape 对话框

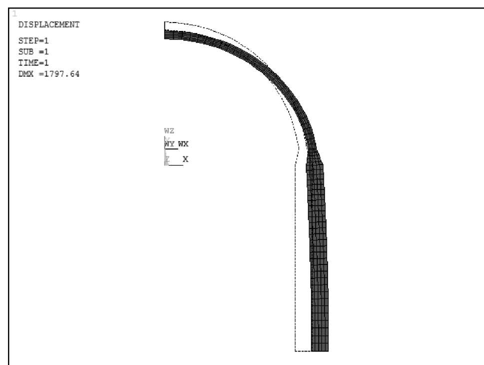


图 8-139　变形图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 8-140 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择 DOF Solution 列表中的 Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示位移云图，如图 8-141 所示。以同样的方法显示项目的节点解，如图 8-142 ~ 图 8-145 所示。

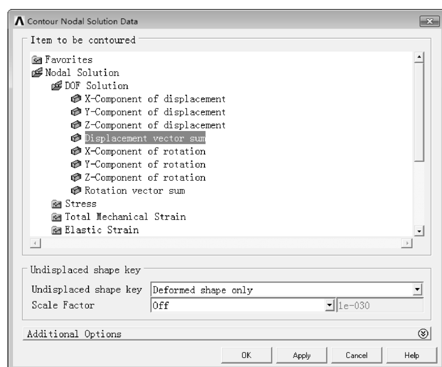


图 8-140　Contour Nodal Solution Data 对话框

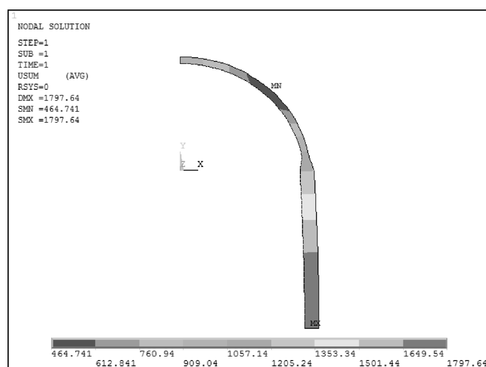


图 8-141　显示位移

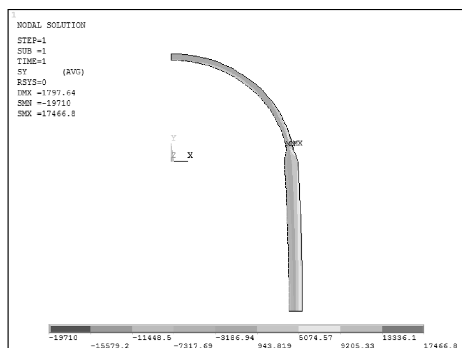


图 8-142　Y 方向应力云图

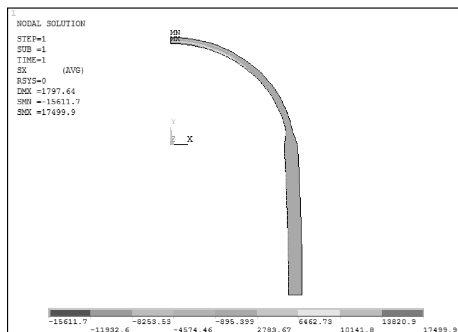


图 8-143　X 方向应力云图

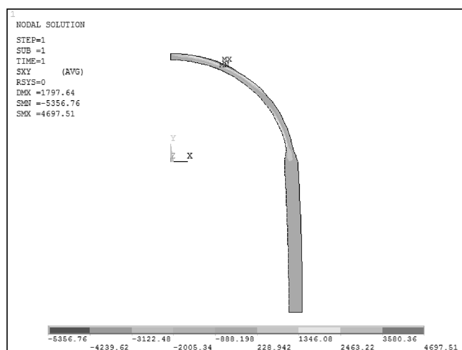


图 8-144　XY 剪应力云图

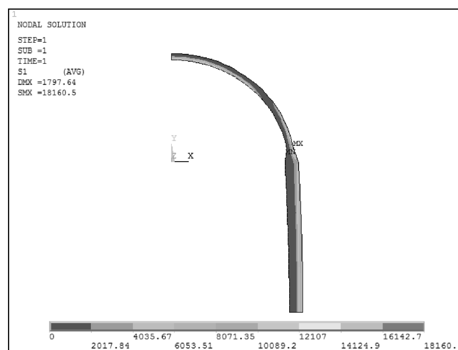


图 8-145　第 1 主应力云图

（19）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Element Solu，在弹出的对话框中选择单元解的项目，单击 OK 按钮，显示单元解结果如图 8-146 ~ 图 8-149 所示。

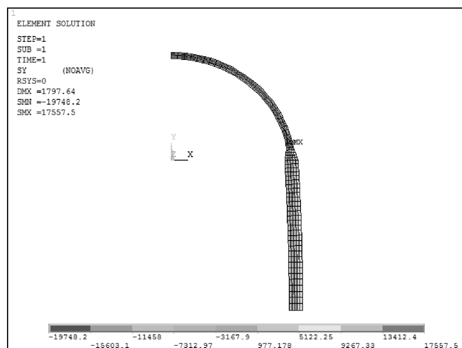


图 8-146　Y 方向单元应力

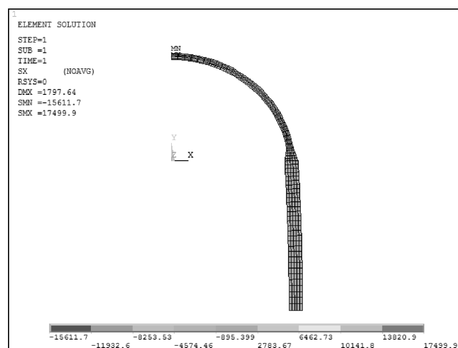
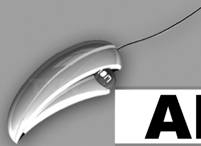


图 8-147　X 方向单元应力

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined 命令，弹出图 8-150 所示的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框。

选择显示的矢量为 Translation U，单击 OK 按钮，则显示图 8-151 所示的平动矢量。

（20）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Symbols 命令，弹出图 8-152 所示的 Symbols 对话框。



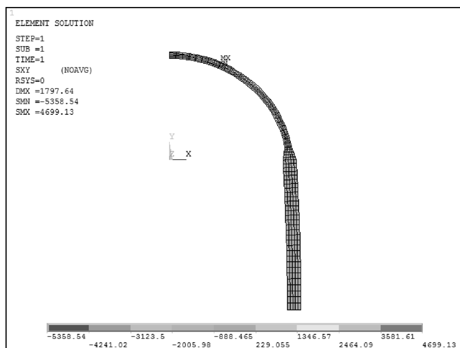


图 8-148 XY 单元剪应力

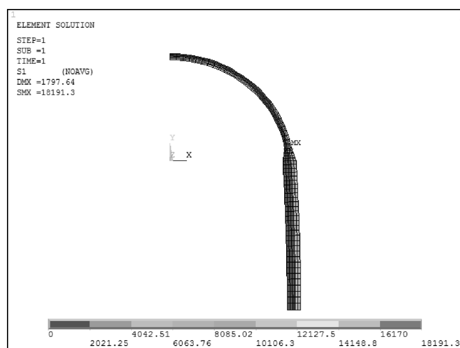


图 8-149 单元第一主应力

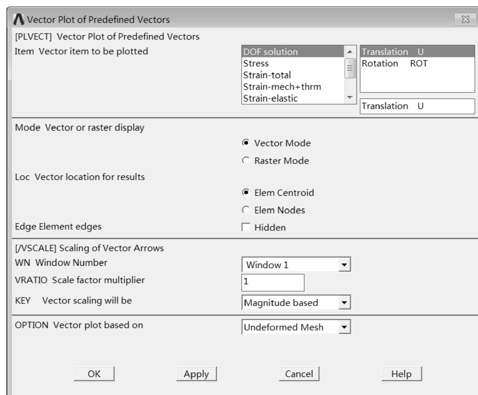


图 8-150 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

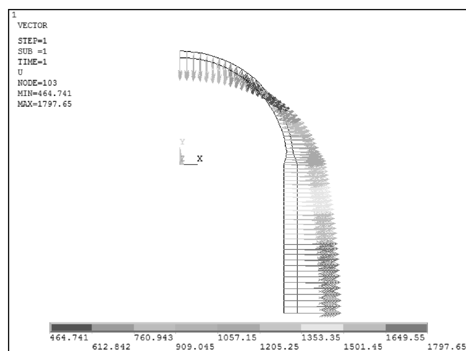


图 8-151 平动矢量

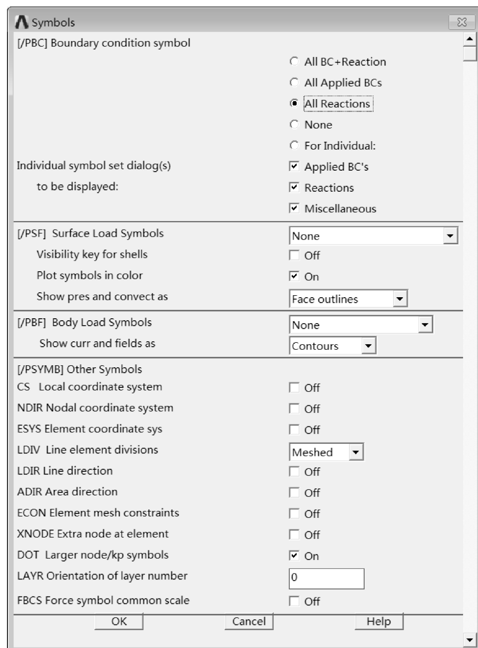


图 8-152 Symbols 对话框

在 Symbols 对话框中选中 All Reactions 单选按钮，单击 OK 按钮。在 GUIL 界面中选择 Utility Menu > Plot > Elements 命令，在工作区中即可显示如图 8-153 和图 8-154 所示的约束节点反力。

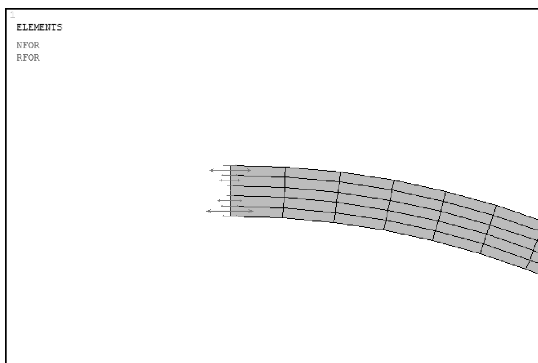


图 8-153　显示约束节点反力

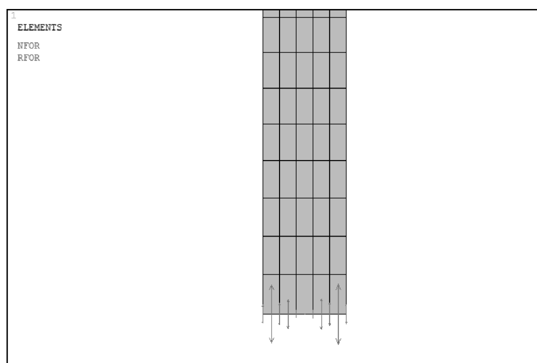


图 8-154　显示约束节点反力

参考上文的介绍，在工作区中显示第 1 主应力节点解的云图，如图 8-155 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Query Results > Subgrid Solu 命令，弹出图 8-156 所示的 Query Subgrid Solution Data 对话框。

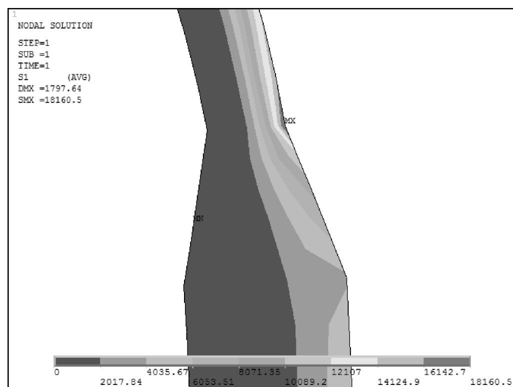


图 8-155　第 1 主应力节点解

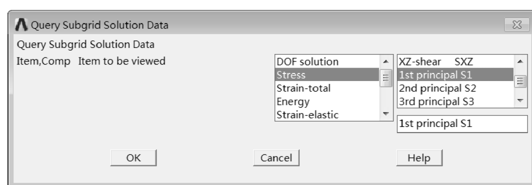


图 8-156　Query Subgrid Solution Data 对话框

在该对话框中选择 Stress > 1st principal S1，单击 OK 按钮，弹出图 8-157 所示的 Query Subgrid Results 对话框。单击 Max 按钮，在 Query Subgrid Results 对话框中即会显示应力最大点的坐标信息，同时该点的应力值也在工作区中被标出，如图 8-158 所示。

（21）单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出图 8-159 所示的 Exit 对话框。

选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS。

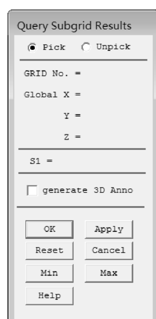


图 8-157　Query Subgrid Results 对话框

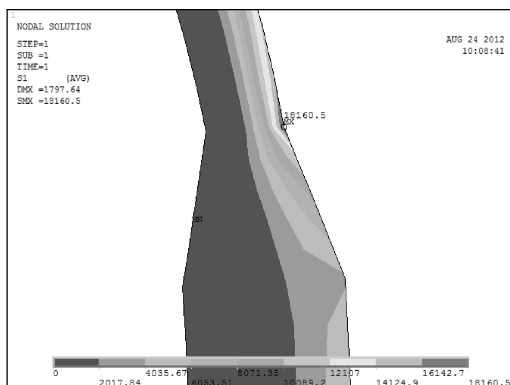


图 8-158　工作区中显示的应力最大点

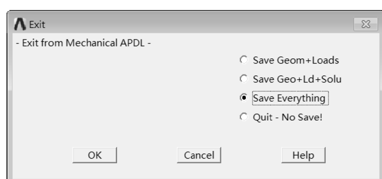


图 8-159　Exit 对话框

8.5　本章小结

静力学分析是进行 ANSYS 有限元分析的基础，学好静力学分析，才可能进一步理解动力学分析、热分析等更为复杂的分析形式。

本章精选的实例丰富、实用，有的偏重于复杂的几何模型，有的偏重于独特的建模方式（没有几何模型，只有有限元模型），还有简化问题进行处理的。经过本章的练习，根据面对的分析问题的不同，采用合理的思路进行应用，应当可以处理一些简单的静力学问题。



第 9 章　结构动力学分析

结构分析在有限元分析中通常划分为静力学分析和动力学分析两种。静力学分析处理的是结构所受到的荷载不随时间变化，这类问题在分析时较为简单，也是最基础的部分。如果作用在结构上的荷载时随时间发生变化的，这就是动力学分析问题，它较静力学分析复杂，但在有限元分析中也是常见的，并且也形成了一定的方法。本章即介绍此类问题的处理方法。

9.1　结构动力学基础知识

在实际工程结构的设计工作中，动力学分析是必不可少的一部分。几乎现代的所有工程结构都面临着动力学问题。在航空航天、船舶、汽车等行业，动力学问题更加突出。在这些行业中将会接触大量的旋转结构，如轴、轮盘等结构。一般来说，这些结构在整个机械中占有极其重要的地位。它们的损坏大部分都是由于共振引起的较大振动应力导致的。同时由于处于旋转状态，它们所受外界激振力比较复杂，更要求对这些关键部件进行完整的动力学分析。

9.1.1 关于荷载

结构动力荷载可以分为简谐性周期荷载、一般周期荷载、冲击荷载。

- 简谐性周期荷载：是指按简谐规律随时间连续变化其量值的荷载，可以用正弦或余弦函数表示。它也称为简谐荷载，是工程中最常见的动力荷载。如图 9-1 所示具有偏心质量的回转机器，当其匀速转动时，传到结构上的由偏心质量 m 产生的离心力 ，其垂直分力和水平分力就是简谐荷载。
- 一般周期荷载：是指除了简谐荷载以外的其他形式的周期荷载。如图 9-2 所示的曲柄连杆机构，当其匀速转动时，产生的水平干扰力的变化规律即为图 9-3 所示的周期性多波形。
- 冲击荷载：是指短时间内作用于结构上，荷载值急剧增大或急剧减小的荷载。例如，各种爆炸荷载、锻锤对机器的碰撞等都属于这类荷载。图 9-4 所示为一种爆炸荷载，荷载值急剧减小。

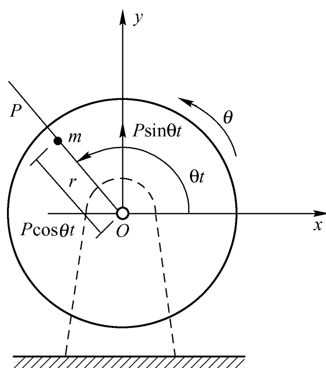


图 9-1　简谐性周期荷载

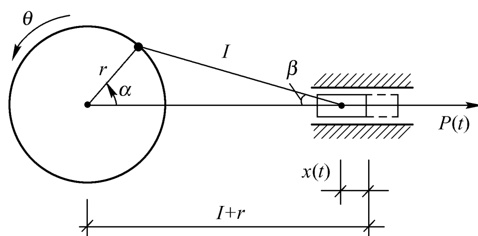


图 9-2　曲柄连杆机构

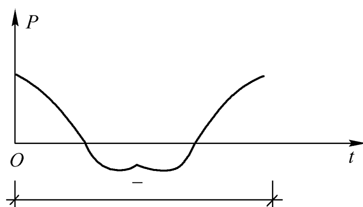


图 9-3　周期性多波形

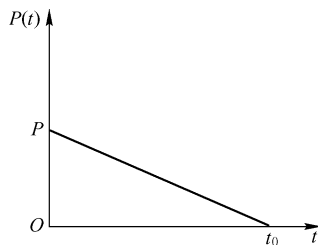


图 9-4　爆炸荷载

9.1.2 结构动力学问题的分类

ANSYS 结构动力学分析可以分为模态分析、瞬态动力学分析、谐响应分析、谱分析等。

1. 模态分析

模态分析用于确定承受动态荷载结构或机器部件的振动特性，即固有频率和振型。模态分析是其他动力学分析的起点，在进行谱分析、模态叠加法谐响应分析或瞬态动力学分析前必须经历这一分析过程。

ANSYS 可以对有预应力的结构和循环对称结构进行模态分析。前者有旋转的涡轮叶片等的模态分析，后者则允许建立一部分循环对称结构的模型来完成对整个结构的模态分析。ANSYS 产品家族中的模态分析是一种线性分析，任何非线性特性，如塑性和接触（间隙）单元，即使定义了也将被忽略。

ANSYS 提供了 7 种模态提取方法，分别是子空间法、分块 Lanczos 法、PowerDynamics 法、缩减法、非对称法、阻尼法和 QR 阻尼法。阻尼法和 QR 阻尼法允许在结构中存在阻尼。后面将详细介绍模态提取方法。

2. 瞬态动力学分析

瞬态动力学分析（亦称时间–历程分析）是用于确定承受任意的随时间变化荷载结构的动力学响应的一种方法。可以用瞬态动力学分析确定结构在稳态荷载、瞬态荷载和简谐荷载的随意组合作用下的随时间变化的位移、应变、应力及力。

荷载和时间的相关性使得惯性力和阻尼作用比较重要。如果惯性力和阻尼作用不重要，就可以用静力学分析代替瞬态动力学分析。

3. 谐响应分析

任何持续的周期荷载将在结构系统中产生持续的周期响应（谐响应）。谐响应分析是用于确定线性结构在承受随时间按正弦（简谐）规律变化的荷载时的稳态响应的一种技术。

分析的目的是计算出结构在几种频率下的响应并得到一些响应值（通常是位移）对应频率的曲线。从这些曲线上可以找到“峰值”响应，并进一步观察峰值频率对应的应力。该技术只计算结构的稳态受迫振动，而不考虑发生在激励开始时的瞬态振动。

谐响应分析使设计人员能预测结构的持续动力特性，从而验证其设计能否成功地克服共振、疲劳，以及其他受迫振动引起的有害效果。

4. 谱分析

谱分析是一种将模态分析的结果与一个已知的谱联系起来，计算模型的位移和应力的分析技术。谱分析可以替代费时的时间－历程分析，主要用于确定结构对随机荷载或随时间变化荷载（如地震、风载、海洋波浪、喷气发动机推力、火箭发动机振动等）的动力响应情况。

9.2 ANSYS 模态分析

模态分析用于确定设计结构或机器部件的振动特性（固有频率和振型），即结构的固有频率和振型，它们是承受动态荷载结构设计中的重要参数。同时，也可以作为其他动力学分析问题的起点。

9.2.1 模态提取方法

典型的无阻尼模态分析求解的基本方程是经典的特征值问题：

$$[\boldsymbol{K}]\{\phi_i\} = \omega_i^2[\boldsymbol{M}]\{\phi_i\}$$

式中，$[\boldsymbol{K}]$ = 刚度矩阵；

$\{\phi_i\}$ = 第 i 阶模态的振型向量（特征向量）；

ω_i = 第 i 阶模态的固有频率（ω_i^2是特征值）；

$[\boldsymbol{M}]$ = 质量矩阵。

有许多数值方法可用于求解上面的方程。ANSYS 提供了 7 种模态提取方法：分块 Lanczos 法、子空间（Subspace）法、Power Dynamics 法、缩减（Reduced/Householder）法、非对称（Unsymmetric）法、阻尼（Damp）法、QR 阻尼法。

1. 分块 Lanczos 法

分块 Lanczos 法特征值求解器是默认求解器，它采用 Lanczos 算法，即用一组向量来实现 Lanczos 递归计算。这种方法和子空间法一样精确，但速度更快。无论 EQSLV 命令指定过以何种求解器进行求解，分块 Lanczos 法都将自动采用稀疏矩阵方程求解器。

计算某系统特征值谱所包含一定范围的固有频率时，采用分块 Lanczos 法提取模态特别有效。计算时，从频率谱中间位置到高频端范围内的固有频率的求解收敛速度和求解低阶频率时基本上一样快。因此，当采用频移频率（FREQB）来提取 FREQB（起始频率）的 n 阶模态时，该法提取大于 FREQB 的 n 阶模态和提取 n 阶低频模态的速度基本相同。

2. Power Dynamics 法

Power Dynamics 法内部采用子空间迭代计算，但采用 PCG 迭代求解器。这种方法明显地比子空间法和分块 Lanczos 法快。但是，如果模型中包含形状较差的单元或病态矩阵，则可能出现不收敛问题。该法特别适用于求解超大模型（大于 100000 个自由度）的起始少数阶模态。谱分析不要使用该方法提取模态。

Power Dynamics 法不进行 Sturm 序列检查（即不检查模态遗漏问题），这可能影响有多个重复频率问题的解。此法总是采用集中质量近似算法，即自动采用集中质量矩阵。

3. 缩减（Reduced/Householder）法

缩减法采用 HBI 算法（Householder－二分－逆迭代）来计算特征值和特征向量。由于该方法采用一个较小的自由度子集即主自由度（DOF）来计算，因此计算速度更快。

主自由度（DOF）导致计算过程中会形成精确的［$\boldsymbol{K}$］矩阵和近似的［$\boldsymbol{M}$］矩阵（通常会有一些质量损失）。因此，计算结果的精度将取决于［$\boldsymbol{M}$］阵的近似程度，近似程度又取决于主自由度的数目和位置。

4. 非对称（Unsymmetric）法

非对称法也采用完整的［$\boldsymbol{K}$］和［$\boldsymbol{M}$］矩阵，适用于刚度和质量矩阵为非对称的问题（如声学中流体－结构耦合问题）。此法采用 Lanczos 算法，如果系统是非保守的（例如轴安装在轴承上），这种算法将解得复数特征值和特征向量。

特征值的实部表示固有频率，虚部是系统稳定性的量度——负值表示系统是稳定的，而正值表示系统是不稳定的。该方法不进行 Sturm 序列检查，因此有可能遗漏一些高频端模态。

5. 阻尼（Damp）法

阻尼法用于阻尼不能被忽略的问题，如转子动力学研究。该法使用完整矩阵（［$\boldsymbol{K}$］、［$\boldsymbol{M}$］及阻尼阵［$\boldsymbol{C}$］）。阻尼法采用 Lanczos 算法，计算得到复数特征值和特征向量。此法不能用 Sturm 序列检查，因此有可能遗漏所提取频率的一些高频端模态。

6. QR 阻尼法

QR 阻尼法同时具有分块 Lanczos 法与复 Hessenberg 法的优点，其最关键的思想是，以线性合并无阻尼系统少量数目的特征向量近似表示前几阶复阻尼特征值。

采用实特征值求解（分块 Lanczos 法）无阻尼振型之后，运动方程将转化到模态坐标系。然后，采用 QR 阻尼法，一个相对较小的特征值问题就可以在特征子空间中求解出来了。

该方法能够很好地求解大阻尼系统模态解，阻尼可以是任意阻尼类型，即无论是比例阻尼或非比例阻尼都可以。由于该方法的计算精度取决于提取的模态数目，所以建议提取足够多的基频模态，特别是阻尼较大的系统更应当如此，这样才能保证得到好的计算结果。

该方法不建议用于提取临界阻尼或过阻尼系统的模态。该方法输出实部和虚部特征值（频率），但仅仅输出实特征向量（模态振型）。

9.2.2 网架的模态分析

网架结构是由多根杆件按照一定的网格形式通过节点连接而成的空间结构，具有空间受力、重量轻、刚度大、抗震性能好等优点，可用作体育馆、影剧院、展览厅、候车厅、体育场看台雨篷、飞机库、双向大柱距车间等建筑的屋盖；缺点是汇交于节点上的杆件数量较多，制作安装较平面结构复杂。

网架结构杆件数量多、结构复杂，在承受振动荷载时易发生共振而导致失效，因此求解其固有频率在工程上具有重要的意义。

有一六角形网架，材料为碳钢，外接圆半径为 30 m，试分析其 10 阶模态的振动特性。

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，弹出 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。

在该窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 框中输入工作目录名称，在 Job Name 框中输入项目名称 9-1，然后单击 Run 按钮，进入 ANSYS 17.0 GUI 界面。

（2）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，弹出图 9-5 所示的 Library of Element Types 对话框，从中选择单元类型为 Beam > 2 node 188（即 BEAM188），单击 OK 按钮。

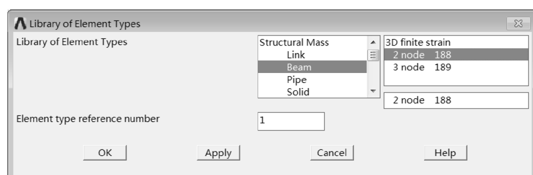


图 9-5　Library of Element Types 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Beam > Common Sections 命令，弹出 Beam Tool 对话框，选择截面类型为四边形，输入截面的宽与高如图 9-6 所示。

（3）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters 命令，弹出 Scalar Parameters 对话框，输入图 9-7 所示的等式，单击 OK 按钮，完成参数定义。

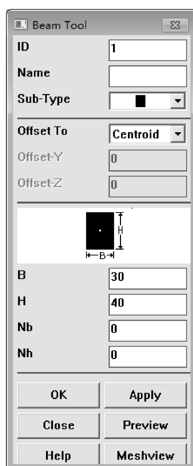


图 9-6　Beam Tool 对话框

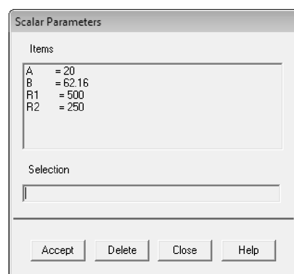


图 9-7　Scalar Parameters 对话框

（4）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出图 9-8 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。

选择 Density，弹出图 9-9 所示的 Density for Material Number 1 对话框，输入密度值 7850，单击 OK 按钮。选择结构、线性、弹性、各向同性材料模型，弹出 Linear Isotropic

Properties for Material Number 1 对话框，输入弹性模量与泊松比如图 9-10 所示。

（5）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cylindrical 命令，将全局坐标系切换至柱坐标系。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，输入关键点编号及其坐标如图 9-11 所示，单击 OK 按钮。

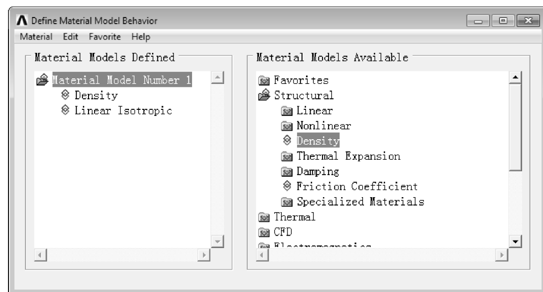


图 9-8 Define Material Model Behavior 对话框

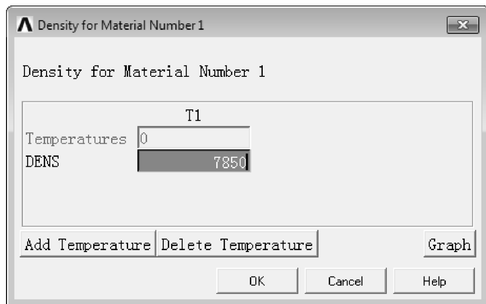


图 9-9 Density for Material Number 1 对话框

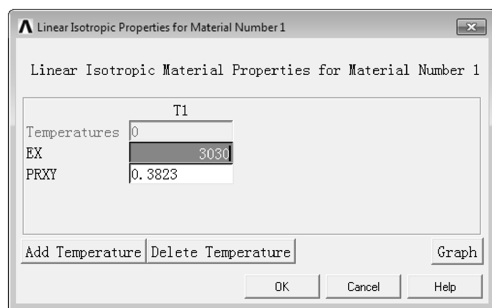


图 9-10 输入弹性模量与泊松比

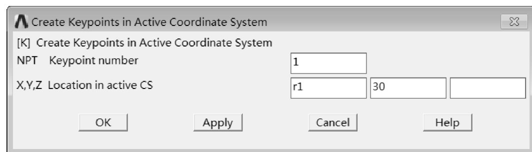


图 9-11 定义关键点

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Keypoints 命令，拾取 1 号关键点，单击 OK 按钮，弹出 Copy Keypoints 对话框，设置参数如图 9-12 所示，单击 OK 按钮，完成关键点的复制。

此时工作区中生成 6 个关键点，如图 9-13 所示。

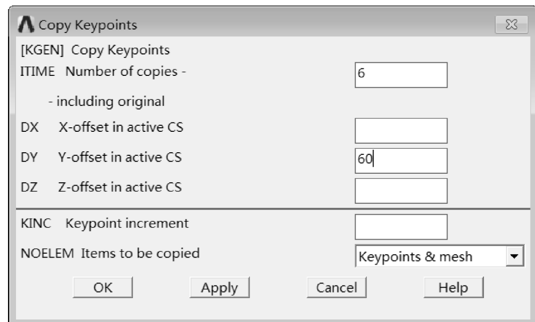


图 9-12 Copy Keypoints 对话框

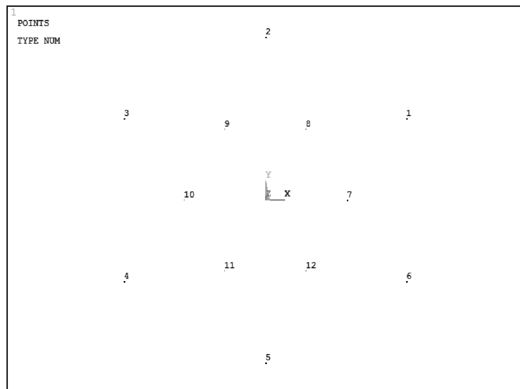


图 9-13 生成关键点

（6）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，输入关键点编号及其坐标如图 9-14 所示，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Keypoints 命令，拾取 7 号关键点，单击 OK 按钮，弹出 Copy Keypoints 对话框，设置参数如图 9-15 所示，单击 OK 按钮，完成关键点的复制。

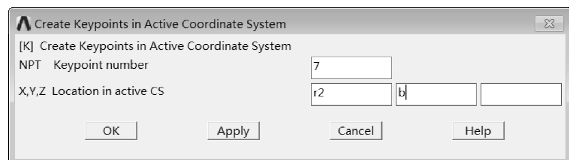


图 9-14　定义关键点

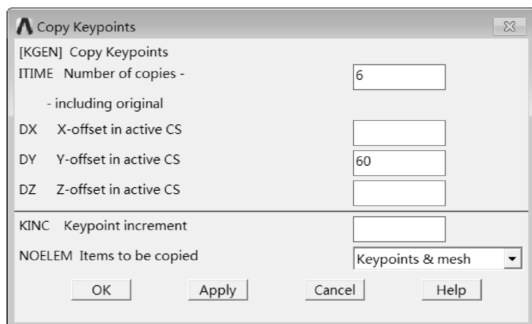


图 9-15　Copy Keypoints 对话框

此时工作区中生成 12 个关键点，如图 9-16 所示。

请读者参考上文介绍，自行定义最后一个关键点，编号为 13，Z = a + b，结果应如图 9-17 所示。

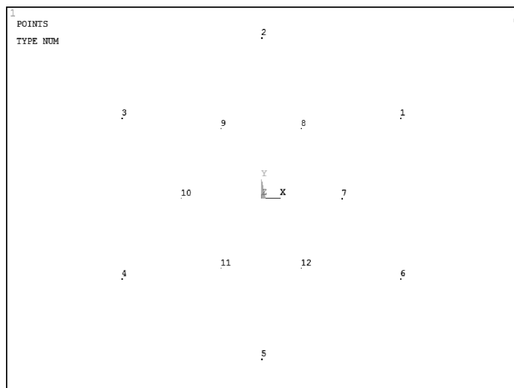


图 9-16　生成关键点

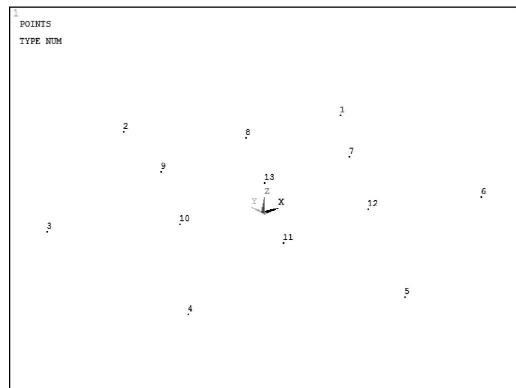
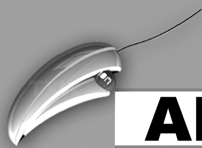


图 9-17　完成关键点定义

（7）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord 命令，拾取 1 号与 7 号关键点，单击 Apply 按钮再拾取 1 号与 8 号关键点，单击 OK 按钮。生成两条线，如图 9-18 所示。重复上述操作，按照表 9-1 所示的对应关系，连接工作区中的关键点，结果应如图 9-19 所示。

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord 命令，拾取 1 号与 7 号关键点，单击 Apply 按钮。再拾取 1 号与 8 号关键点，单击 OK 按钮。生成两条线，如图 9-20 连线所示。



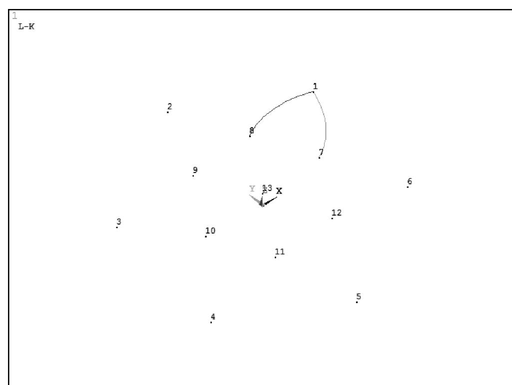


图 9-18　连线

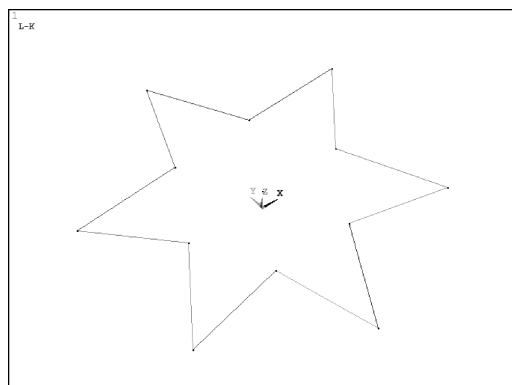


图 9-19　连线

表 9-1　连接关键点（1）

关键点 1	关键点 2	关键点 1	关键点 2
1	8	2	8
2	9	3	9
3	10	4	10
4	11	5	11
5	12	6	7
1	7	6	12

重复上述操作，按照表 9-2 所示的对应关系，连接工作区中的关键点，结果应如图 9-21 所示。

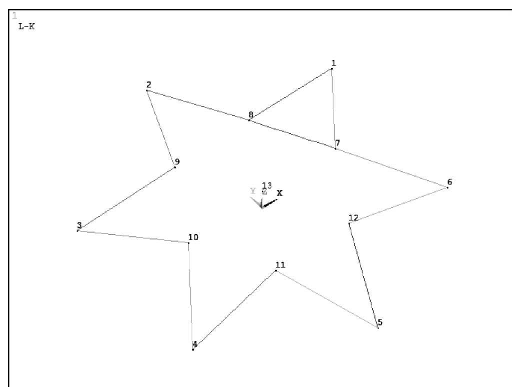


图 9-20　连线

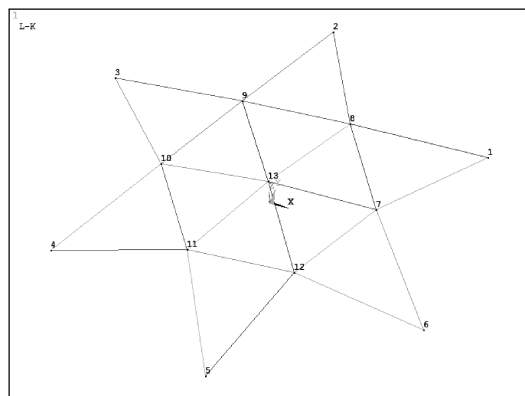


图 9-21　连线

表 9-2　连接关键点（2）

关键点 1	关键点 2	关键点 1	关键点 2
7	8	7	13
8	9	8	13
9	10	9	13
10	11	10	13
11	12	11	13
12	7	12	13

（9）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Lines > All Lines 命令，弹出图 9-22 所示的 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，设置划分份数为 10，单击 OK 按钮。完成定义的尺寸如图 9-23 所示。

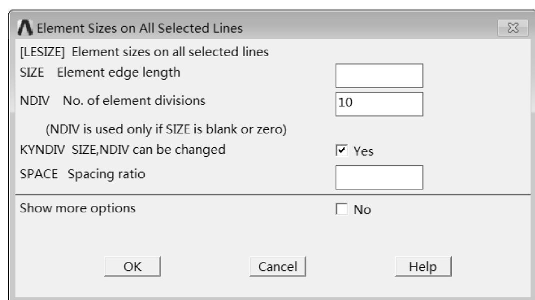


图 9-22　Element Sizes on All Selected Lines 对话框

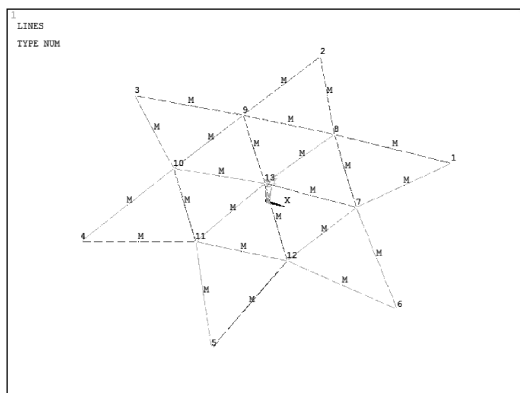


图 9-23　完成尺寸定义

（10）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，完成单元划分后如图 9-24 所示。

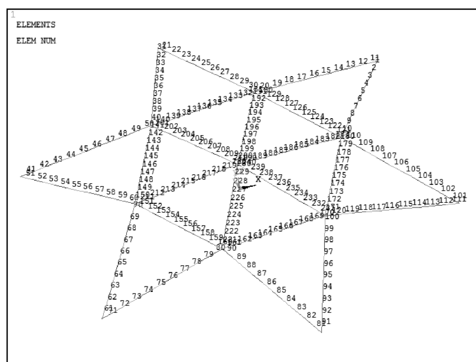


图 9-24　划分单元

（11）完成模型的定义后，施加约束。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Keypoints 命令，拾取 1 ~6 号关键点，单击 OK 按钮，弹出图 9-25 所示 Apply U,ROT on KPs 对话框。

选择要约束的自由度为 All DOF，单击 OK 按钮，完成约束后如图 9-26 所示。

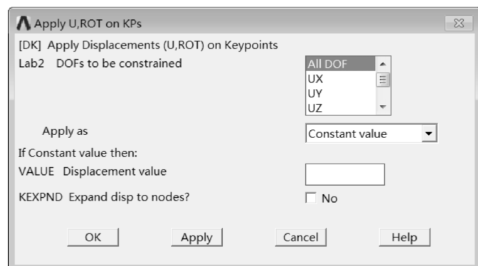


图 9-25　Apply U,ROT on KPs 对话框

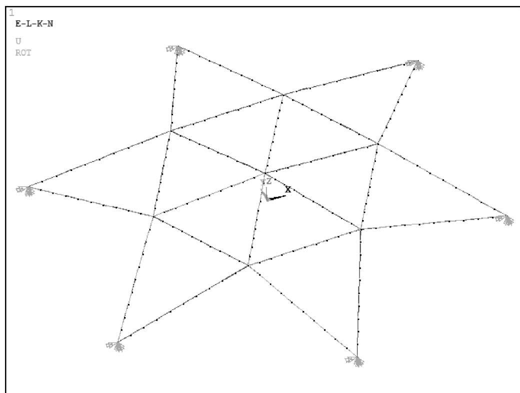


图 9-26　约束

（12）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 9-27 所示的 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Modal，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options 命令，弹出 Modal Analysis 对话框，设置模态分析参数如图 9-28 所示，单击 OK 按钮。

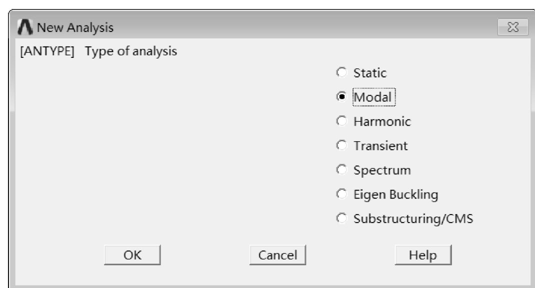


图 9-27 New Analysis 对话框

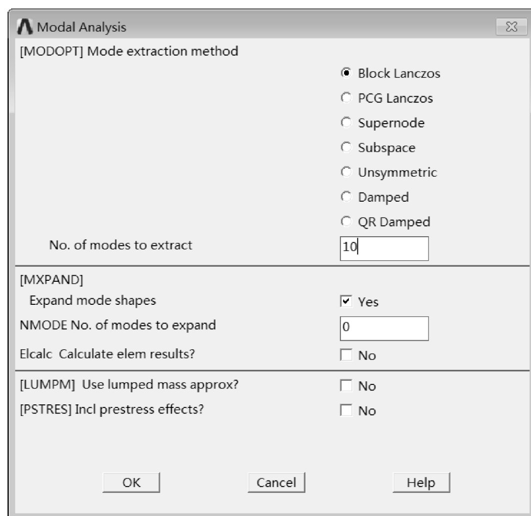


图 9-28 Modal Analysis 对话框

（13）完成了建模、划分网格、施加边界条件，计算前的准备工作已做好，下一步即可以进行求解。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，在弹出的图 9-29 所示/STATUS Command 窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 9-30 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

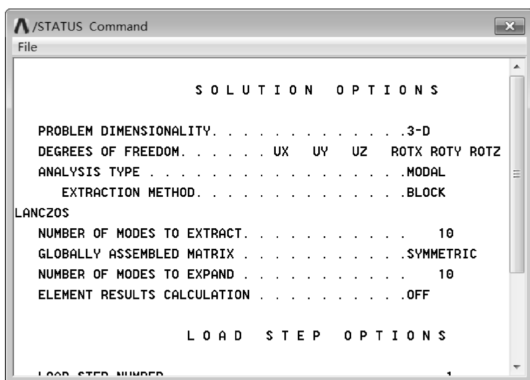


图 9-29 /STATUS Command 窗口

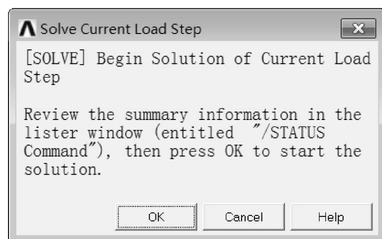


图 9-30 Solve Current Load Step 对话框

单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明求解完成。

本例也可使用命令流进行求解。

```
finish                    !
/clear                    ! 清空工作区
```

```
/prep7                              ! 进入前处理器
et,1,188                            ! 定义单元
sectype,1,beam,rect                 ! 定义截面
secdata,30,40                       !

r1 =500                             ! 参数设置
r2 =250                             !
b =62.16                            !
a =20                               !

mp,ex,1,3030.0                      ! 材料参数
mp,prxy,1,3030/1096/2 -1            !
mp,dens,1,7850                      !

csys,1                              ! 切换为柱坐标
k,1,r1,30                           ! 生成关键点
kgen,6,1,1,,,60                     ! 复制关键点
k,7,r2,,b                           !
kgen,6,7,7,,,60                     !
k,13,,,a +b                         !

csys,0                              ! 切换笛卡尔坐标
*do,i,1,5,1                         ! 连线
l,i,i +6                            !
l,i,i +7                            !
*enddo                              !
l,6,7                               !
l,6,12                              !
*do,i,7,11,1                        !
l,i,i +1                            !
*enddo                              !
l,12,7                              !
*do,i,7,12,1                        !
l,i,13                              !
*enddo                              !

lesize,all,,,10                     ! 定义单元尺寸
lmesh,all                           ! 划分网格
finish                              !

/SOLU                               ! 进入求解器
ANTYPE,MODAL                        ! 设置分析类型为模态分析
MODOPT,LANB,10                      ! 定义模态提取方法
MXPAND,10                           ! 展开 10 阶模态

ksel,s,loc,z,0                      !
dk,all,all                          ! 约束
ksel,all                            !
ALLSEL,ALL                          !
SOLVE                               ! 求解
FINISH                              !
```

（14）求解完成后，在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Results Summary 命令，在弹出的图 9-31 所示 SET，LIST Command 窗口中显示了网架的前 10 阶固有频率。

SET,LIST Command

File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.52399E-04	1	1	1
2	0.64942E-04	1	2	2
3	0.64942E-04	1	3	3
4	0.87944E-04	1	4	4
5	0.87944E-04	1	5	5
6	0.10003E-03	1	6	6
7	0.10038E-03	1	7	7
8	0.13973E-03	1	8	8
9	0.14645E-03	1	9	9
10	0.14645E-03	1	10	10

图 9-31　前 10 阶固有频率

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > First Set 命令，读入第 1 阶的结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape 命令，弹出图 9-32 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。选择 Def + undef edge，单击 OK 按钮，显示第 1 阶振形，如图 9-33 所示。

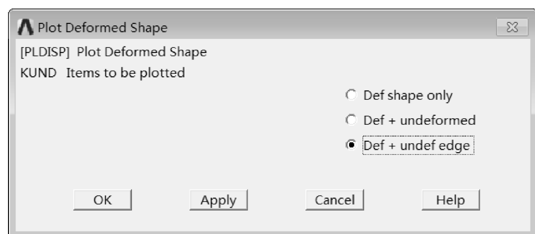


图 9-32　Plot Deformed Shape 对话框

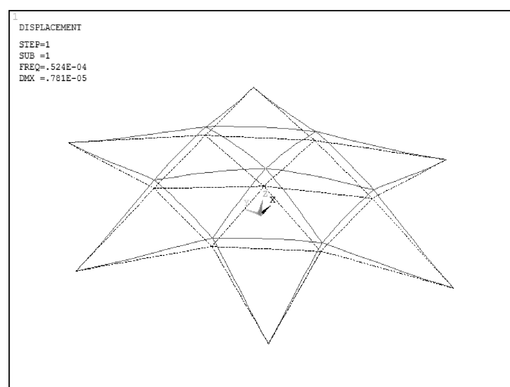


图 9-33　第 1 阶振型图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > Next Set 命令，依次读取其后 4 阶结果，显示各阶振型，如图 9-34 ~ 图 9-37 所示。

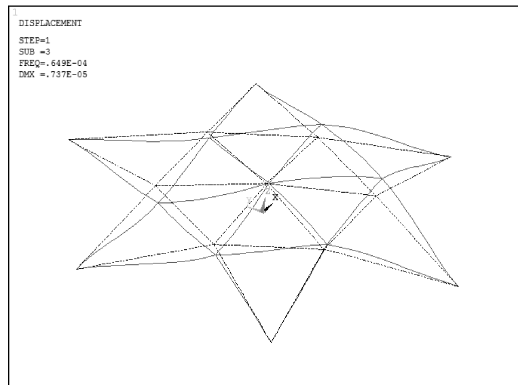


图 9-34　第 3 阶振型图

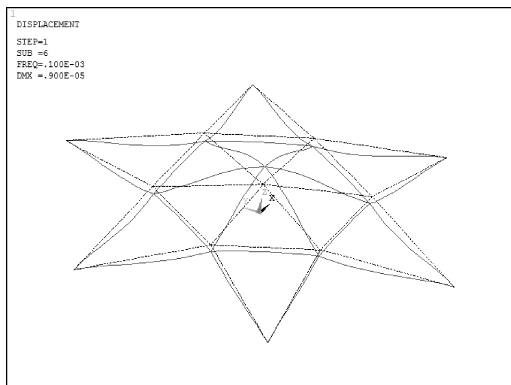


图 9-35　第 6 阶振型图

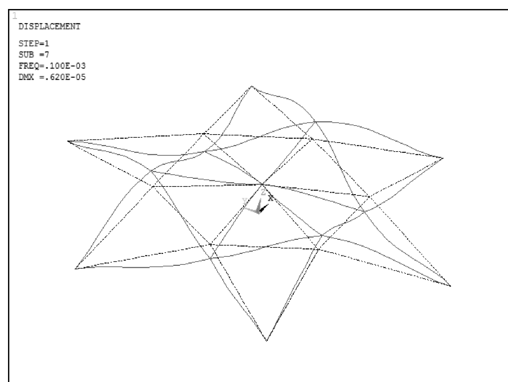


图 9-36　第 7 阶振型图

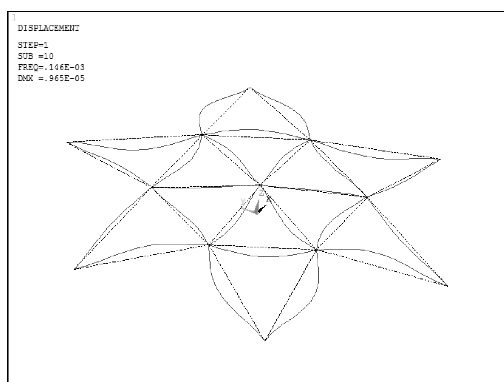


图 9-37　第 10 阶振型图

（15）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 9-38 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择位移矢量，单击 OK 按钮，显示第 1 阶振型云图，如图 9-39 所示。

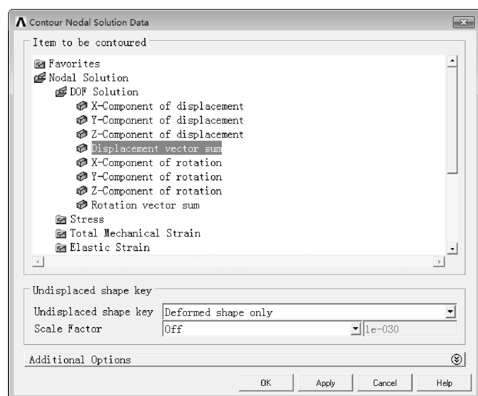


图 9-38　Contour Nodal Solution Data 对话框

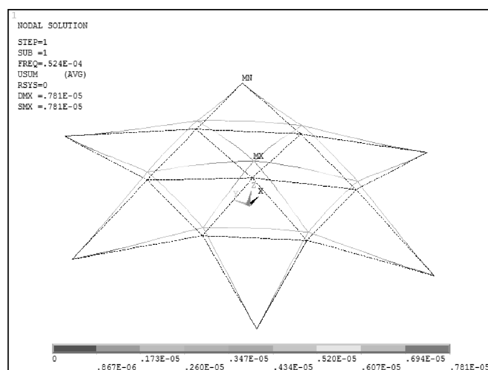


图 9-39　第 1 阶振型位移云图

读取其后各阶结果，显示各阶振型位移云图，如图 9-40 ~ 图 9-43 所示。

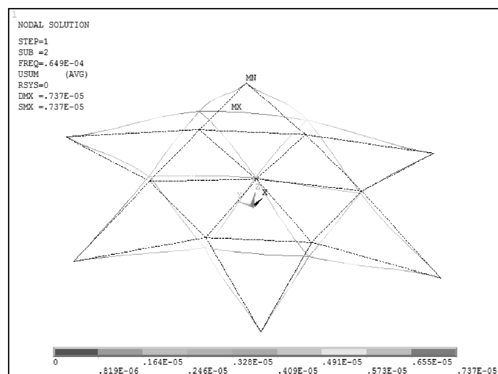


图 9-40　第 2 阶振型位移云图

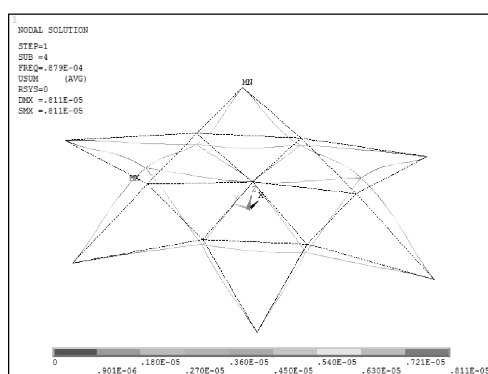


图 9-41　第 4 阶振型位移云图

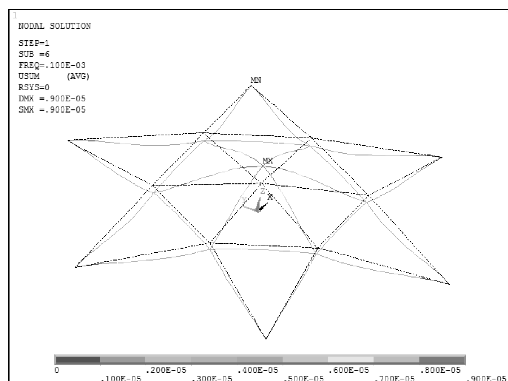


图 9-42 第 6 阶振型位移云图

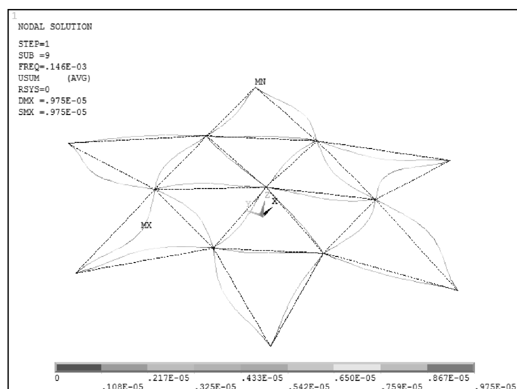


图 9-43 第 9 阶振型位移云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined 命令，弹出图 9-44 所示的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框。选择平移位移矢量，单击 OK 按钮，显示第 1 阶振型矢量图，如图 9-45 所示。

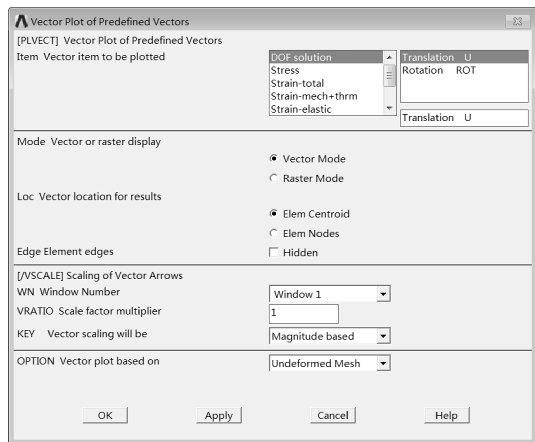


图 9-44 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

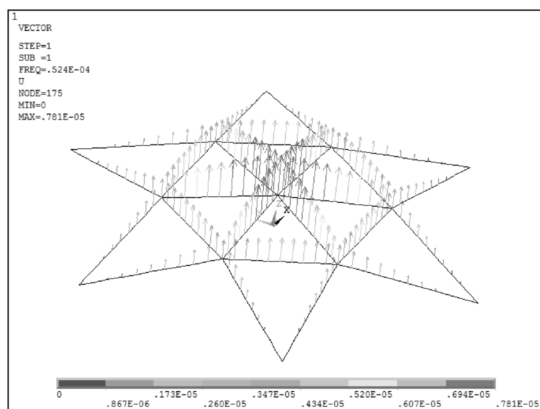


图 9-45 第 1 阶振型位移矢量图

依次读取其后 4 阶结果，显示各阶振型位移矢量图，如图 9-46 ~ 图 9-49 所示。

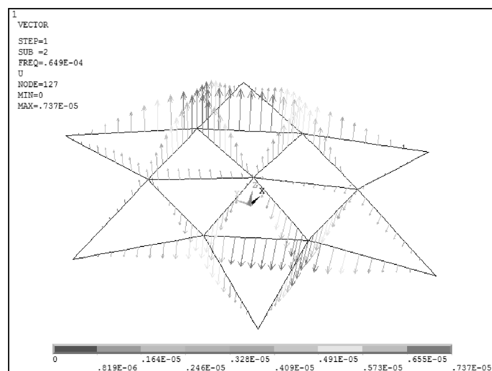


图 9-46 第 2 阶振型位移矢量图

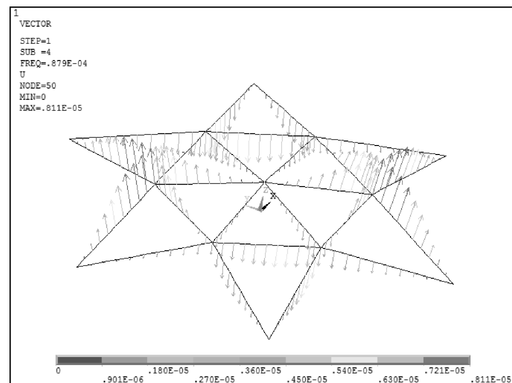


图 9-47 第 4 阶振型位移矢量图

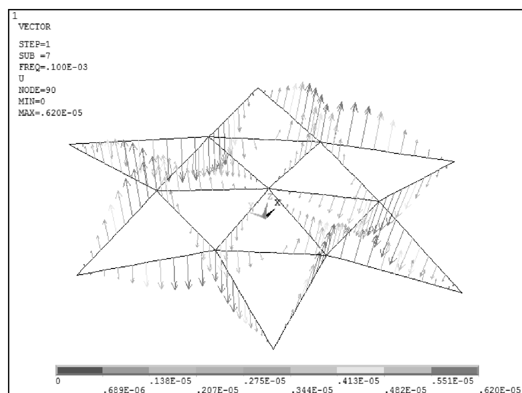


图 9-48　第 7 阶振型位移矢量图

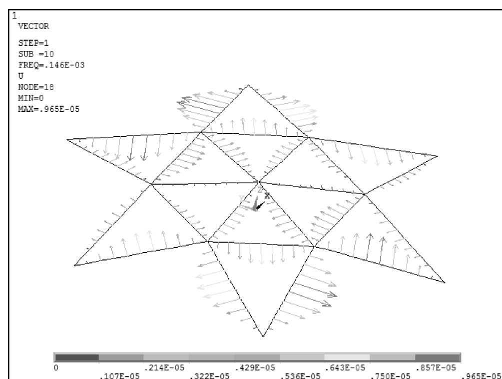


图 9-49　第 10 阶振型位移矢量图

选择 Utilitymenu > PlotCtrls > Animate > Mode Shape 命令，弹出图 9-50 所示的 Animate Mode Shape 对话框。

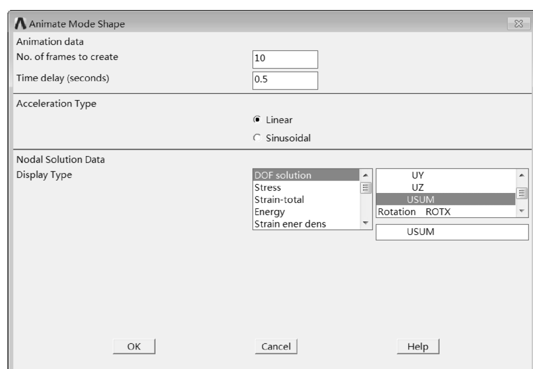


图 9-50　Animate Mode Shape 对话框

选择 USUM，单击 OK 按钮，即可以在工作区中运行动画仿真。

(16) 单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出 Exit 对话框。选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS。

9.3　ANSYS 谐响应分析

任何持续的周期荷载将在结构系统中产生持续的周期响应（谐响应）。谐响应分析是用于确定线性结构在承受随时间按正弦（简谐）规律变化的荷载时的稳态响应的一种技术，如图 9-51 所示。分析的目的是计算出结构在几种频率下的响应并得到一些响应值（通常是位移）对应频率的曲线。从这些曲线上可以找到“峰值”响应，并进一步观察峰值频率对应的应力。该技术只计算结构的稳态受迫振动，而不考虑发生在激励开始时的瞬态振动。谐响应分析使设计人员能预测结构的持续动力特性，从而验证其设计能否成功地克服共振、疲劳，以及其他受迫振动引起的有害效果。

谐响应分析是一种线性分析。任何非线性特性，如塑性和接触（间隙）单元，即使定

义了也将被忽略。分析中可以包含非对称系统矩阵（如分析在流体—结构相互作用的问题时）。谐响应分析也可以用来分析有预应力结构，如小提琴的弦（假定简谐应力比预加的拉伸应力小得多）。

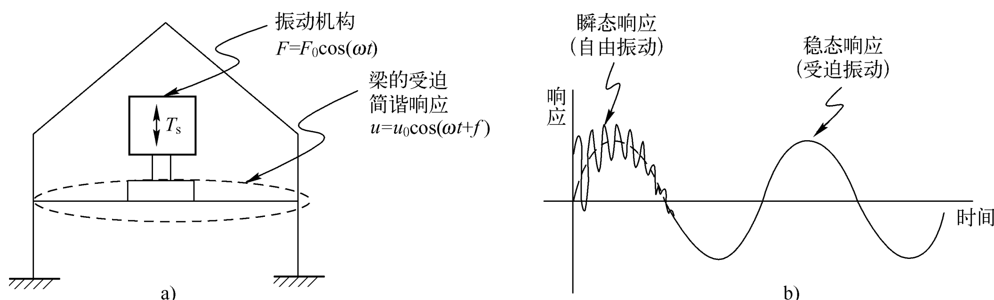


图 9-51　典型的谐响应分析

9.3.1 谐响应分析的方法

谐响应分析可采用 3 种方法：完全法、缩减法、模态叠加法。

● 完全法

完全法是最易使用的方法。它采用完整的系统矩阵计算谐响应（没有矩阵缩减）。矩阵可以是对称的或非对称的。

完全法的优点：容易使用，因为不必关心如何选取主自由度或振型；使用完整矩阵，因此不涉及质量矩阵的近似；允许有非对称矩阵，这种矩阵在声学或轴承问题中很典型；用单一处理过程计算出所有的位移和应力；允许定义各种类型的荷载，如节点力、外加的（非零）位移、单元荷载（压力和温度）；允许在实体模型上定义荷载。

完全法的缺点：预应力选项不可用；当采用 Frontal 方程求解器时，这种方法通常比其他方法开销大，但在采用 JCG 求解器或 ICCG 求解器时，完全法的效率很高。

● 缩减法

缩减法通过采用主自由度和缩减矩阵来压缩问题的规模。主自由度处的位移被计算出来后，解可以被扩展到初始的完整 DOF 集上。

缩减法的优点：在采用 Frontal 求解器时比完全法更快且开销小；可以考虑预应力效果。

缩减法的缺点：初始解只计算出主自由度处的位移，要得到完整的位移、应力和力的解，则需执行扩展过程（扩展过程在某些分析应用中是可选操作）；不能施加单元荷载（压力、温度等）；所有荷载必须施加在用户定义的主自由度上（限制了采用实体模型上所加荷载）。

● 模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到的振型（特征向量）乘上因子并求和来计算出结构的响应。

模态叠加法的优点：对于许多问题，此法比缩减法或完全法更快且开销小；模态分析中施加的荷载可以通过 LVSCALE 命令用于谐响应分析中；可以使解按结构的固有频率聚集，以便得到更平滑、更精确的响应曲线图；可以包含预应力效果；允许考虑振型阻尼（阻尼系数为频率的函数）。

模态叠加法的缺点：不能施加非零位移；在模态分析中使用 PowerDynamics 法时，初始

条件中不能有预加的荷载。

谐响应分析的 3 种方法存在共同的局限性：所有荷载必须随时间按正弦规律变化；所有荷载必须有相同的频率；不允许有非线性特性；不计算瞬态效应。可以通过瞬态动力学分析来克服这些限制，稍后即进入瞬态动力学分析的学习。

9.3.2 吉他发声过程仿真分析

图 9-52 所示为一简化的吉他弦计算模型。弦形状均匀，直径为 d，长度为 l。在水平方向施加上拉伸力 F_1，两端等效为刚性支点。在弦的 1/4 长度处以力 F_2 弹击此弦，要求计算弦的固有频率。

几何尺寸：$l=710$ mm，$c=165$ mm，$d=0.254$ mm。

材料特性：$E=190\times10^9$ Pa，$\rho=7920$ kg/m^3。

荷载为：$F_1=84$ N，$F_2=1$ N

取弹击力的频率范围为 0 ~ 2000 Hz，绘制出位移响应 – 频率的关系曲线。

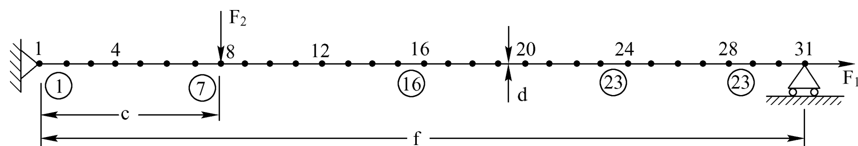


图 9-52 弦

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Envivonment、Lisence、Working Directory，在 Job Name 框中输入项目名称 9-2，然后单击 Run 按钮，进入 ANSYS 17.0 GUI 界面。

（2）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，弹出 Element Type 对话框。

单击 Add 按钮，弹出图 9-53 所示的 Library of Element Types 对话框。在该对话框中选择单元类型为 Link > 3D finit stn 180（即 LINK180），单击 OK 按钮。

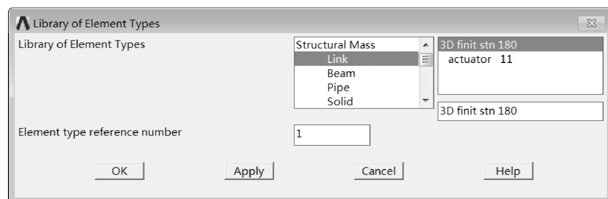


图 9-53 Library of Element Types 对话框

此时回到 Element Type 对话框中，即可看到已添加的单元，如图 9-54 所示。

（3）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出图 9-55 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。选择结构、线性、弹性、各向同性模型，弹出图 9-56 所示的 Density for Material Number 1 对话框。

在 EX 框中输入 1.9E+011，在 PRXY 框中输入 0.3，即设置弹性模量为 1.9e11Pa，泊松比为 0.3，单击 OK 按钮。

回到图 9-55 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择结构、密度，弹出如图 9-57 所示的 Density for Material Number 1 对话框。

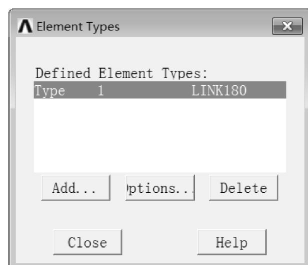


图 9-54 Element Type 对话框

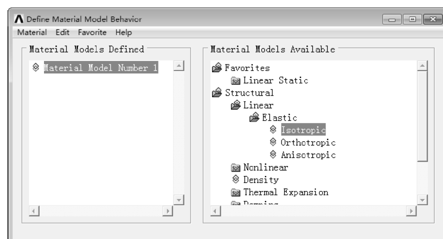


图 9-55 Define Material Model Behavior 对话框

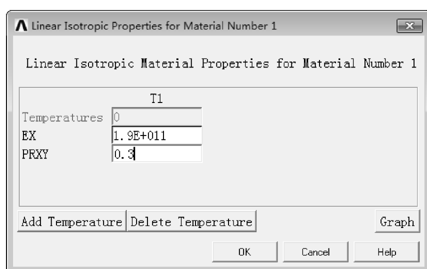


图 9-56 各向同性线弹性材料参数

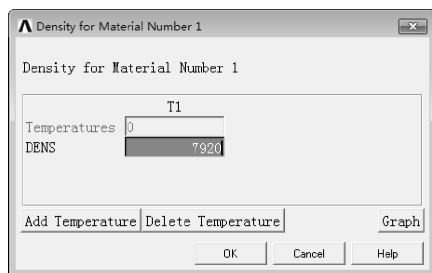


图 9-57 Density for Material Number 1 对话框

在 DENS（材料密度）中输入 7920，单击 OK 按钮。

（4）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete 命令，弹出图 9-58 所示的 Real Constants 对话框。

单击 Add 按钮，弹出图 9-59 所示的 Element Type for Real Constants 对话框。在 Choose element type 列表框中选择 Type 1 LINK180，即先前定义的单元类型，单击 OK 按钮，弹出图 9-60 所示的 Real Constant Set Number 1 for LINK180 对话框。



图 9-58 Real Constants 对话框

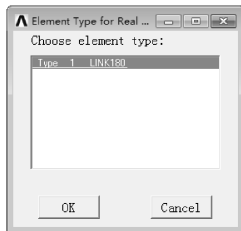


图 9-59 Element Type for Real Constants 对话框

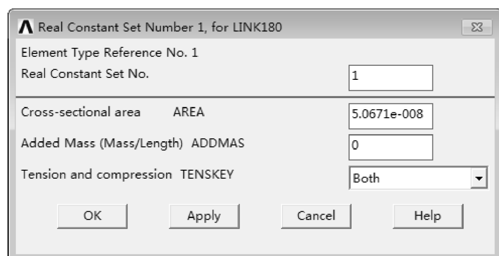


图 9-60 Real Constant Set Number 1 for LINK180

在 Real Constant Set No.（实常数编号）框中输入 1，在 Cross – sectional area AREA（截面积）框中输入 5.0671E –008，单击 OK 按钮。此时如图 9-61 所示，Real Constants 对话框中列出了已定义的实常数。

（5）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS，弹出 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框。按图 9-62 所示输入第 1 个节点的编号及坐标，单击 Apply 按钮；继续输入 31 号节点的 X 坐标值 0.71，Y、Z 留空即可，单击 OK 按钮，生成的节点如图 9-63 所示。

（6）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Fill Between Nds 命令，弹出 Fill Between Nodes 对话框。拾取上一步生成的两个节点，单击 OK 按钮，弹出图 9-64 所示的 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框。

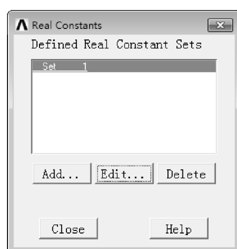


图 9-61　Real Constants 对话框

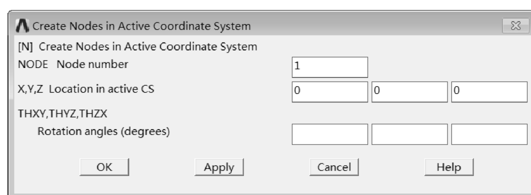


图 9-62　Create Nodes in Active Coordinate System 对话框



图 9-63　生成 2 个节点

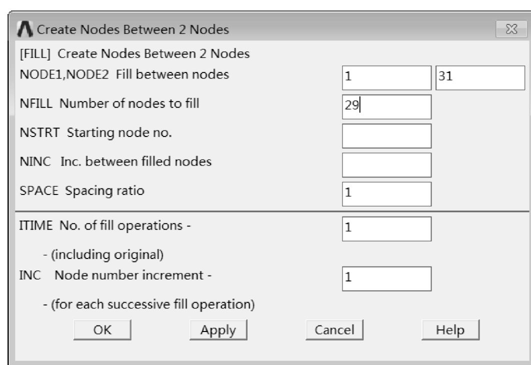


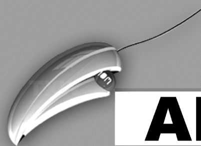
图 9-64　Create Nodes Between 2 Nodes 对话框

保持默认设置，单击 OK 按钮，在 1 号节点与 30 号节点之间生成节点，如图 9-65 所示。

（7）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes 命令，弹出 Element from Nodes 对话框。拾取 1 号与 2 号节点，单击 OK 按钮，生成第 1 个单元，如图 9-66 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Elements > Auto Numbered 命令，弹出拾取对话框。拾取刚生成的 1 号单元，单击 OK 按钮，弹出 Copy Element (Automatically – Numbered) 对话框。设置参数如图 9-67 所示，单击 OK 按钮，生成一系列单元，如图 9-68 所示。

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框。



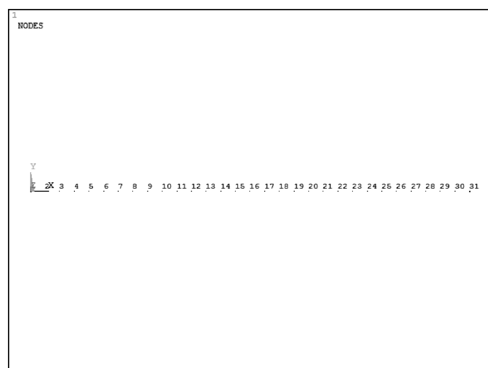


图 9-65　等间距填充的节点

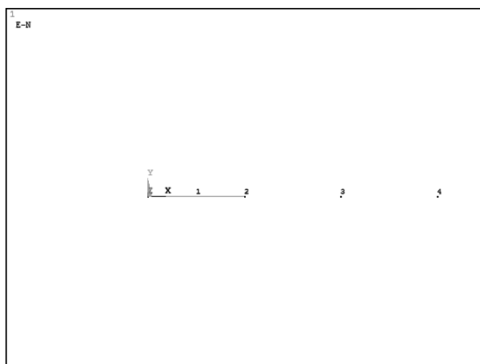


图 9-66　生成第 1 个单元

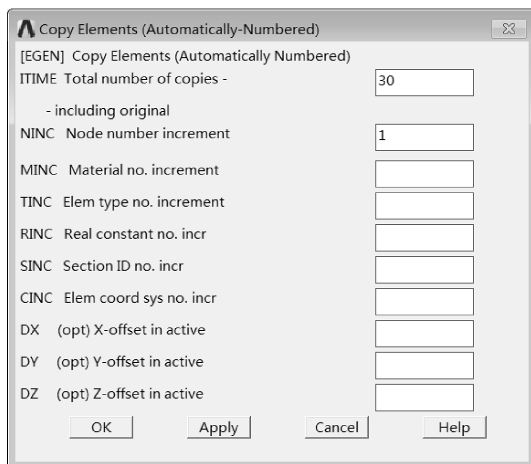


图9-67　Copy Elements(Automatically-Numbered)对话框

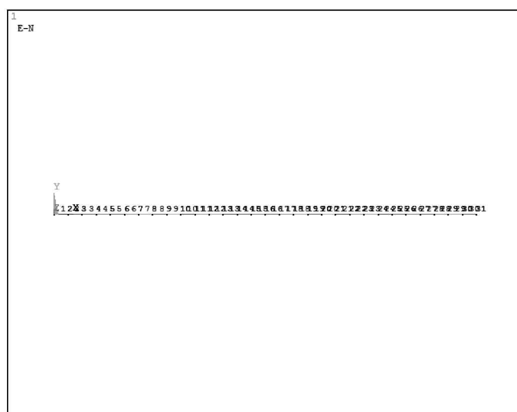


图 9-68　复制单元

选中 1 号节点，如图 9-69 所示。单击 OK 按钮，弹出如图 9-70 所示的 Apply U,ROT on Nodes 对话框。

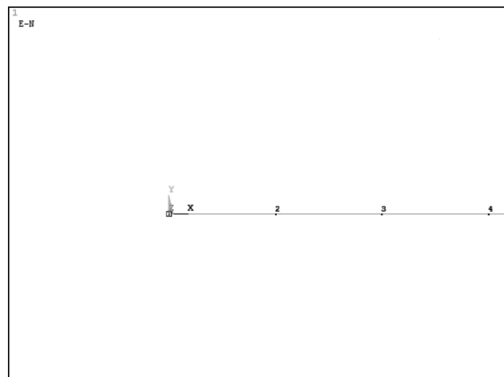


图 9-69　选中 1 号节点

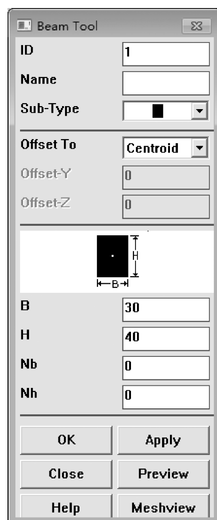


图 9-70　Apply U,ROT on Nodes 对话框

选择 All DOF，单击 OK 按钮，完成 1 号节点的约束，如图 9-71 所示。

（9）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框。

将选择方式改为 Box，框选工作区中除 1 号节点外的所有节点，如图 9-72 所示。单击 OK 按钮，弹出图 9-73 所示的 Apply U,ROT on Nodes 对话框。

选择 All DOF，单击 OK 按钮，完成约束，如图 9-74 所示。

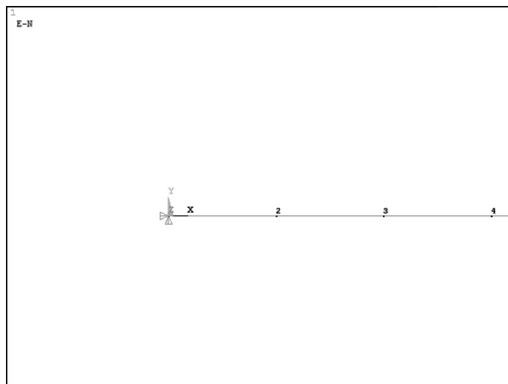


图 9-71　1 号节点固定约束

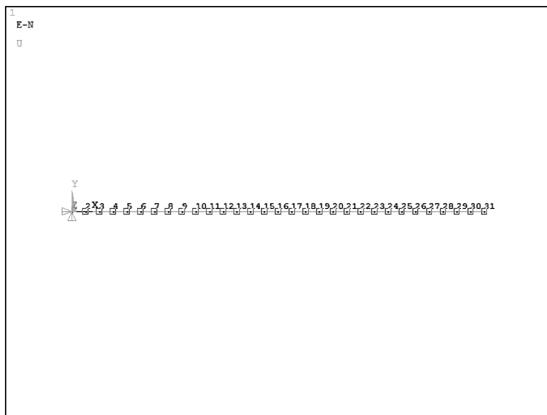


图 9-72　选中的节点

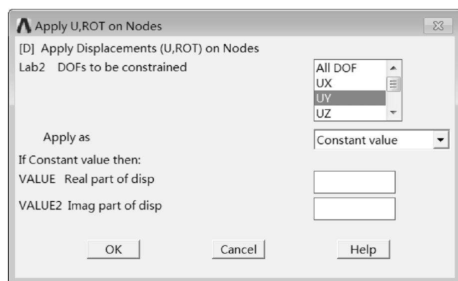


图 9-73　Apply U,ROT on Nodes 对话框

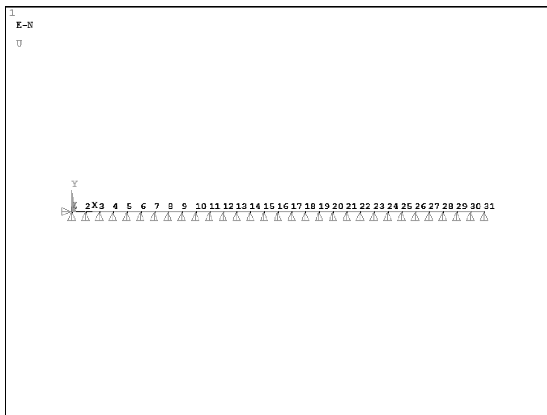


图 9-74　完成约束

在工作区中拾取 31 号节点，如图 9-75 所示。单击 OK 按钮，弹出图 9-76 所示的 Apply F/M on Nodes 对话框。

选择荷载方向为 FX，加载为常量，值为 84，单击 OK 按钮，完成施加的荷载如图 9-77 所示。

（10）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Soln Controls 命令，在弹出 Solution Controls 对话框中选择 Basic 选项卡，如图 9-78 所示。

设置 Analysis Options（分析选项）为 Small Displacement Static，选中 Caculate prestress effects 复选框，单击 OK 按钮。

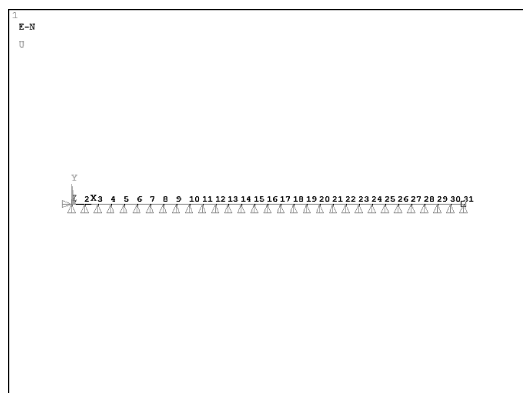


图 9-75　拾取 31 号节点

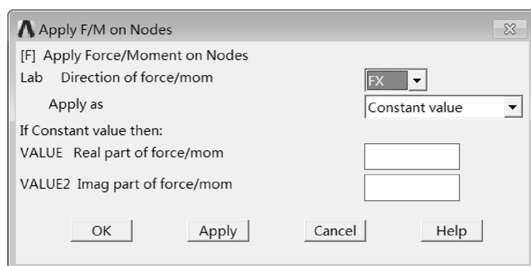


图 9-76　Apply F/M on Nodes 对话框

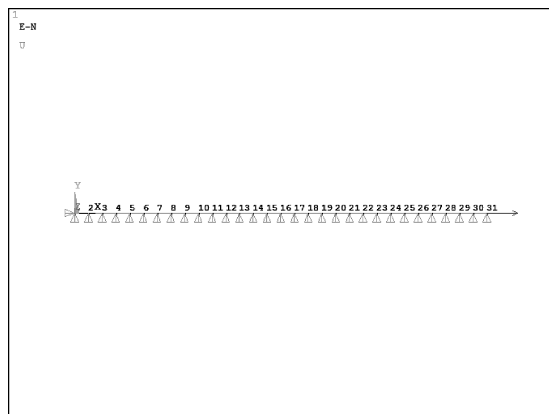


图 9-77　完成加载

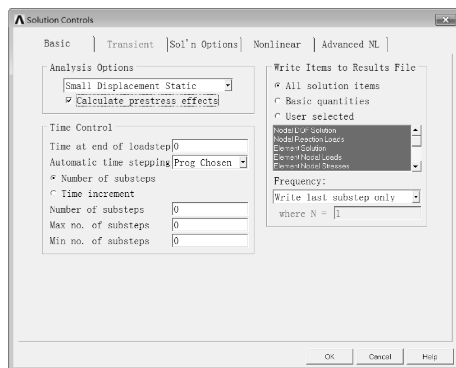


图 9-78　Solution Controls 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Solu Printout 命令，弹出 Solution Printout Controls 对话框，设置如图 9-79 所示，单击 OK 按钮。

（11）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，在弹出的/STATUS Command 窗口中显示了项目的求解信息及输出选项，如图 9-80 所示。

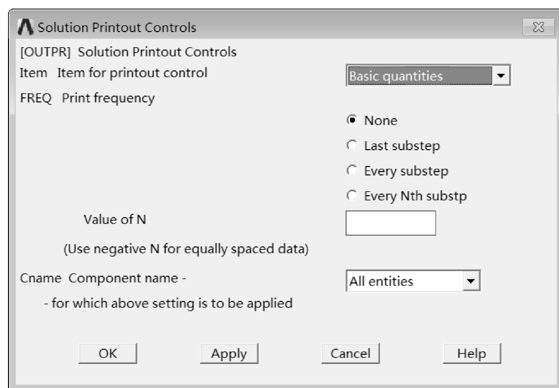


图 9-79　Solution Printout Controls 对话框

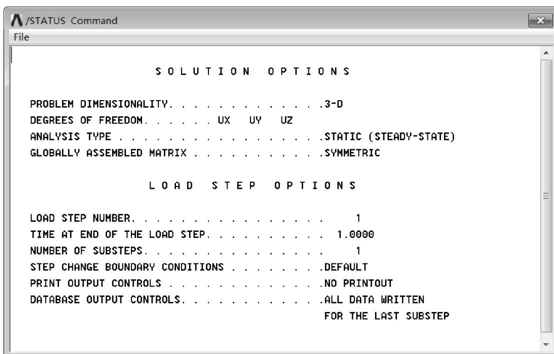


图 9-80　/STATUS Command 窗口

同时弹出的还有图 9-81 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明第 1 步（预应力）求解完成。

（12）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 9-82 所示的 New Analysis 对话框。选择[ANTYPE]Type of analysis（分析类型）为 Modal，即模态分析，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > Analysis Options 命令，弹出 Modal Analysis 对话框。设置参数如图 9-83 所示，单击 OK 按钮。

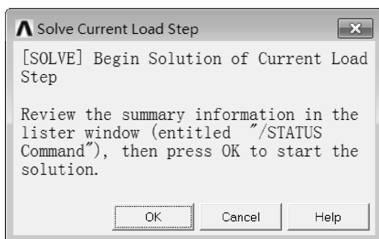


图 9-81 Solve Current Load Step 对话框

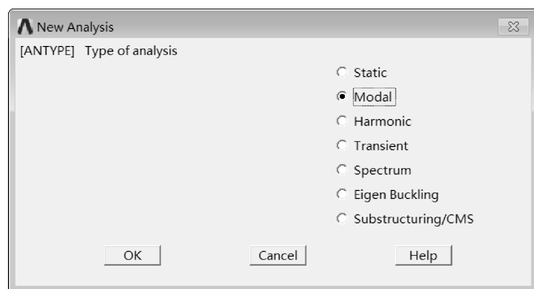


图 9-82 New Analysis 对话框

（13）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Displacement > On Nodes 命令，弹出 Delete Node Constraints 对话框，如图 9-84 所示。

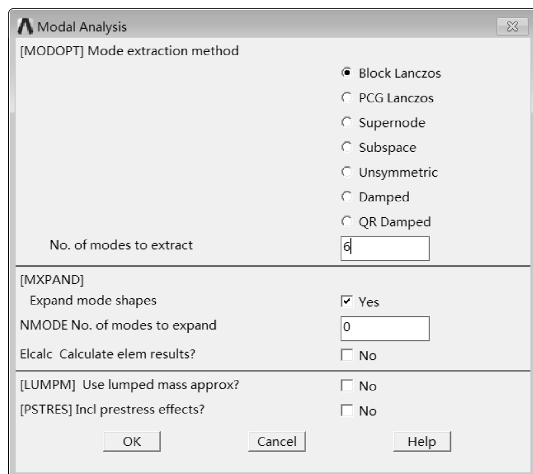


图 9-83 Modal Analysis 对话框

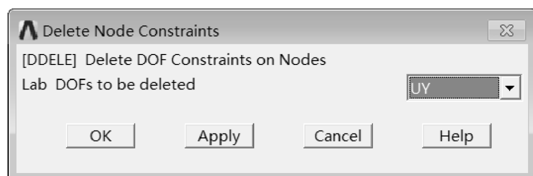


图 9-84 Delete Node Constraints 对话框

选择 UY，单击 OK 按钮，删除约束后如图 9-85 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，在弹出的/STATUS Command 窗口中显示了项目的求解信息及输出选项，如图 9-86 所示。

同时弹出的还有图 9-87 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

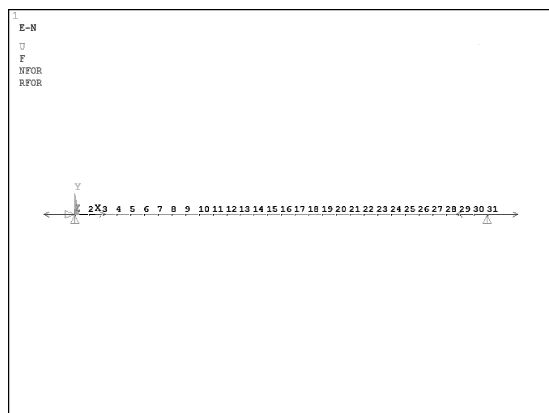


图 9-85 删除约束

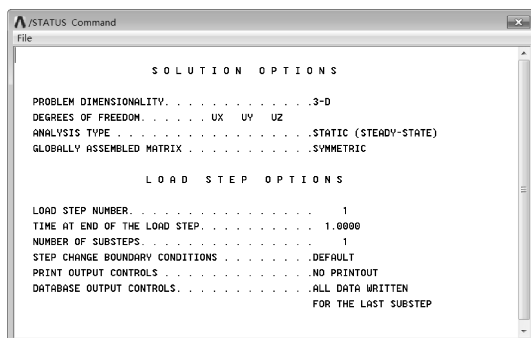


图 9-86 /STATUS Command 窗口

单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明第 2 步（模态）求解完成。

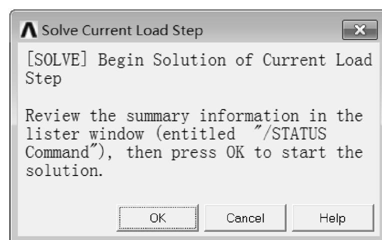


图 9-87 Solve Current Load Step 对话框

（14）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 9-88 所示的 New Analysis 对话框。

选择[ANTYPE]Type of analysis（分析类型）为 Harmonic，即谐响应分析，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > Analysis Options 命令，弹出 Harmonic Analysis 对话框。设置参数如图 9-89 所示，单击 OK 按钮。

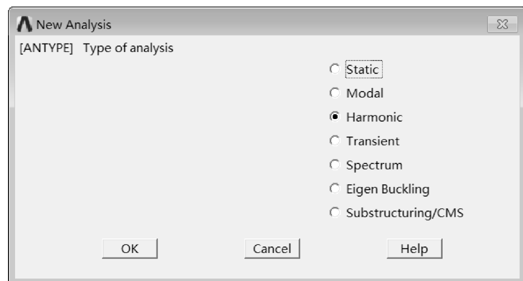


图 9-88 New Analysis 对话框

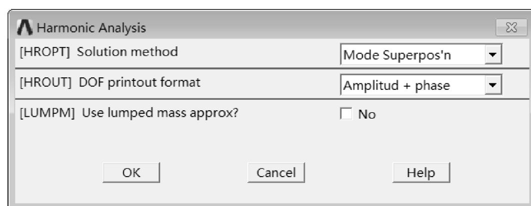


图 9-89 Harmonic Analysis 对话框

在命令输入框中输入如下命令并运行。

```
FDELE,31,FX
F,8,FY,-1
```

将荷载改为图 9-90 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq and Substeps 命令，弹出 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框，设置参数如图 9-91 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Solu Printout 命令，弹出 Solution Printout Controls 对话框，设置参数如图 9-92 所示。

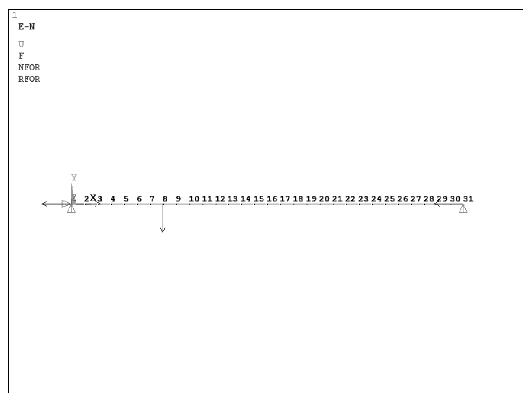


图 9-90　荷载

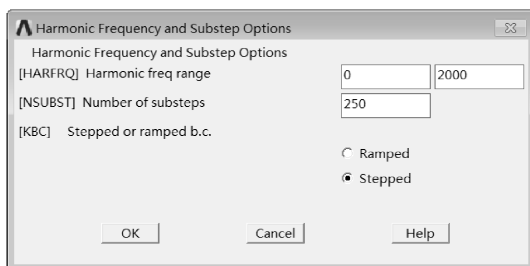


图 9-91　Harmonic Frequency and Substep Options

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > DB/Results File 命令，弹出 Controls for Database and Results File Writing 对话框，设置如图 9-93 所示，单击 OK 按钮。

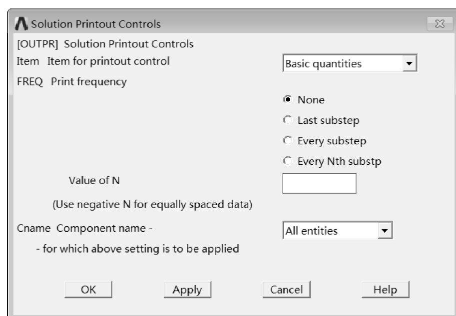


图 9-92　Solution Printout Controls 对话框

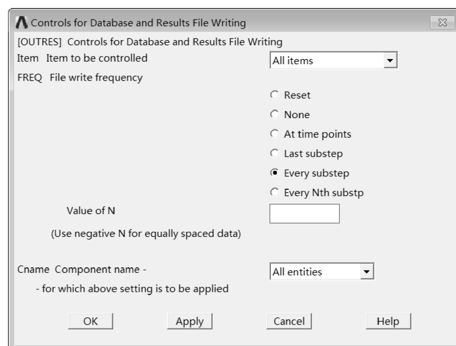


图 9-93　Controls for Database and Results File Writing 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，在弹出的/STATUS Command 窗口中显示了项目的求解信息及输出选项，如图 9-94 所示。

同时弹出的还有图 9-95 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

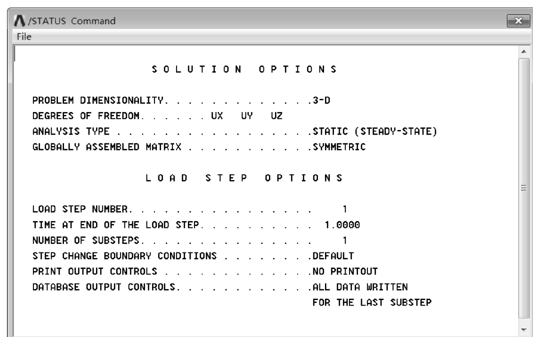


图 9-94　/STATUS Command 窗口

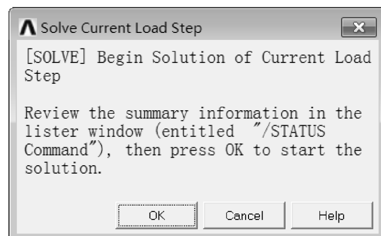


图 9-95　Solve Current Load Step 对话框

单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明第 3 步（谐响应）求解完成。

本例也可用命令流完成操作。

```
/PREP7                          ! 进入前处理器
ANTYPE,STATIC                   ! 设置静态分析
ET,1,LINK180                    ! 定义单元类型
R,1,50671E-12                   ! 实常数

MP,EX,1,190E9                   ! 材料参数
MP,DENS,1,7920                  !

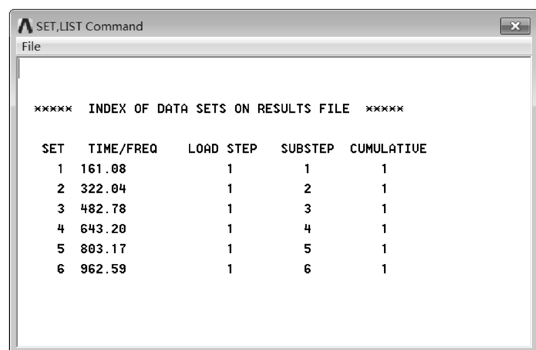
N,1                             ! 生成节点
N,31,.71                        !
FILL                            ! 在 1 号与 31 号节点间均匀生成节点
E,1,2                           ! 连接单元
EGEN,30,1,1                     ! 切分单元
D,1,ALL                         ! 约束两端节点
D,2,UY,,,31                     !
F,31,FX,84                      ! 施加拨弦力
FINISH                          !

/SOLU                           ! 进入求解器
PSTRES,ON                       ! 打开预应力开关
OUTPR,BASIC,1                   !
SOLVE                           ! 求解预应力
FINISH                          !
/SOLU                           !
ANTYPE,MODAL                    ! 求模态解
MODOPT,SUBSP,6                  !
PSTRES,ON                       !
DDEL,2,UY,30                    !
SOLVE                           !
FINISH                          !

/SOLU                           !
ANTYPE,HARMIC! 求谐响应解
HROPT,MSUP,6                    !
HROUT,OFF                       !
PSTRES,ON                       !
FDELE,31,FX                     !
F,8,FY,-1                       !
KBC,1                           !
HARFRQ,,2000                    !
NSUBST,250                      !
OUTPR,,NONE                     !
OUTRES,,1                       !
SOLVE                           !
FINISH                          !
```

（15）求解完成后，在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Results Summary 命令，在弹出的图 9-96 所示的 SET,LIST Command 窗口中显示了前 6 阶固有频率。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > First Set 命令，读入第 1 阶的结果。在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape 命令，显示第 1 阶振形，如图 9-97 所示。


SET,LIST Command

File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	161.08	1	1	1
2	322.04	1	2	1
3	482.78	1	3	1
4	643.20	1	4	1
5	803.17	1	5	1
6	962.59	1	6	1

图 9-96　前 6 阶固有频率

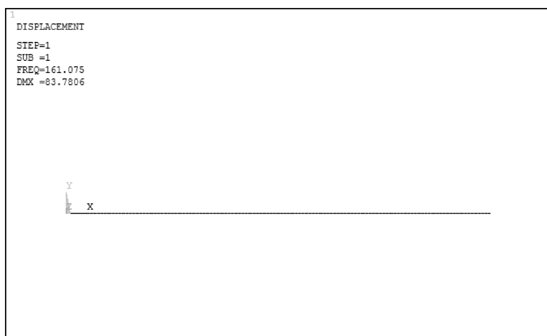


图 9-97　第 1 阶振型图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > Next Set 命令，依次读取其后 5 阶结果，显示 2 ~ 6 阶振型，如图 9-99 ~ 图 9-102 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，显示第 1 阶振型位移云图，如图 9-103 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > Next Set 命令，依次读取其后 4 阶结果，显示 2 ~ 5 阶振型位移云图，如图 9-104 ~ 图 9-108 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > TimeHistory Postpro，弹出图 9-109 所示的 Time History Variables 对话框。

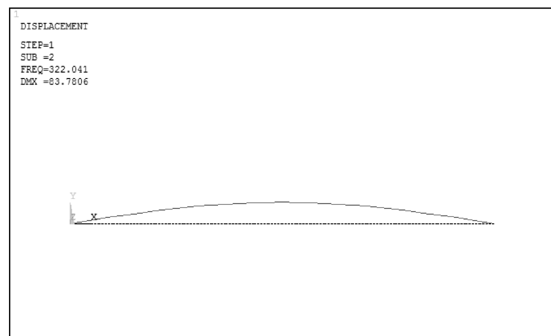


图 9-98　第 2 阶振型图

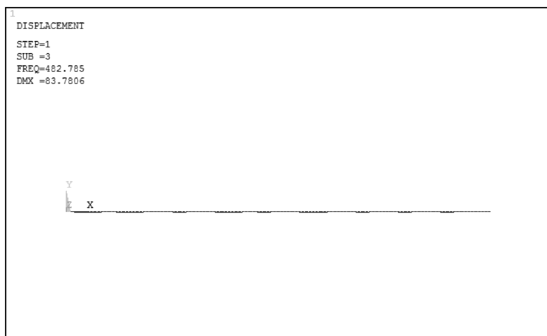


图 9-99　第 3 阶振型图

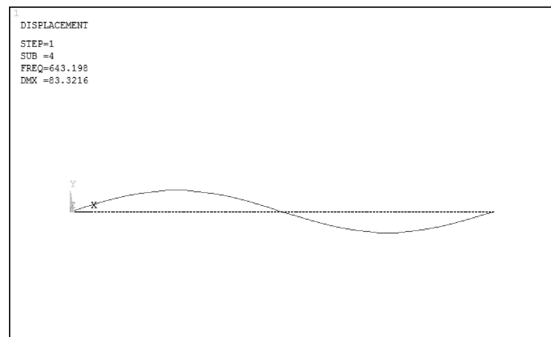


图 9-100　第 4 阶振型图

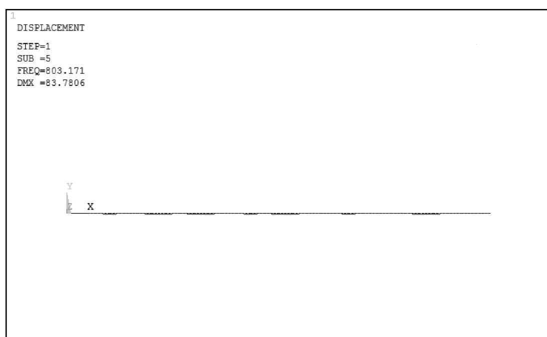


图 9-101　第 5 阶振型图

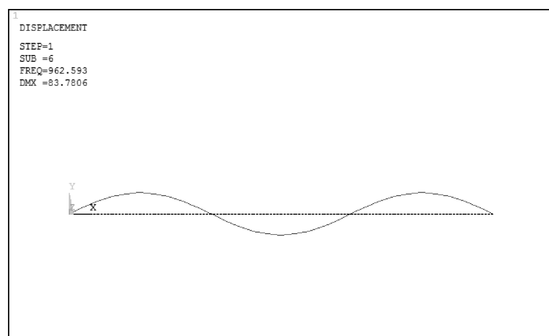


图 9-102 第 6 阶振型图

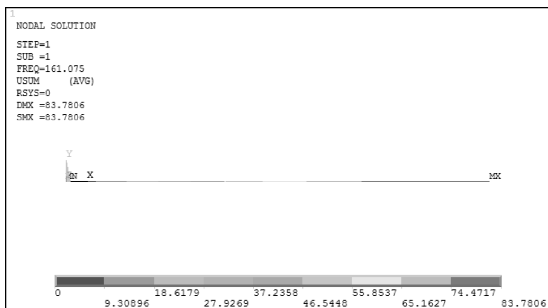


图 9-103 第 1 阶振型位移云图

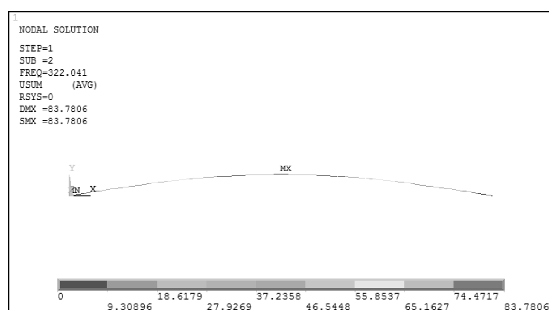


图 9-104 第 2 阶振型位移云图

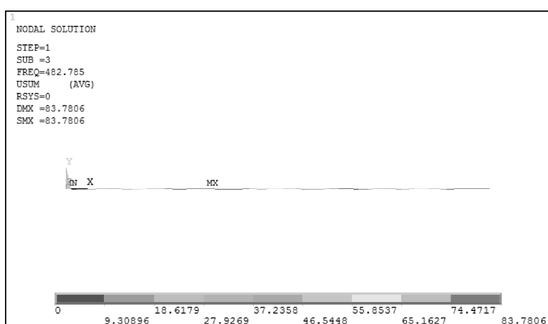


图 9-105 第 3 阶振型位移云图

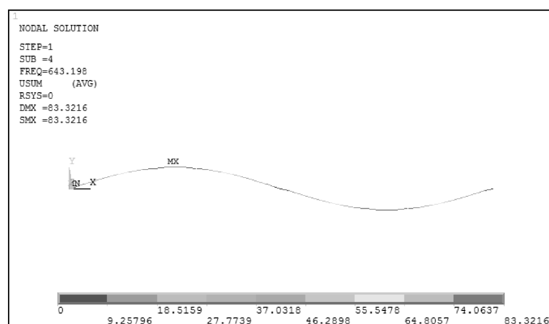


图 9-106 第 4 阶振型位移云图

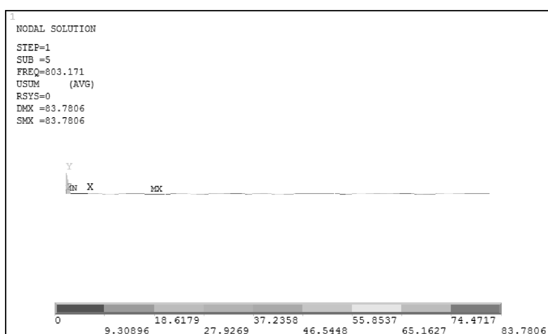


图 9-107 第 5 阶振型位移云图

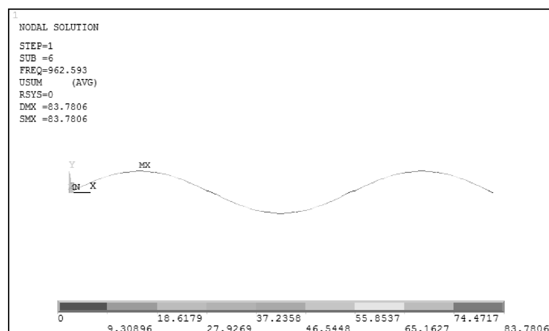


图 9-108 第 6 阶振型位移云图

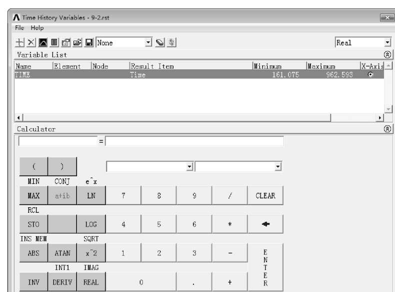


图 9-109 Time History Variables 对话框

选择 Utility Menu > File > Open Results 命令，选择 9-2. rfrq，读入谐响应分析结果。

单击 Time History Variables 对话框中的添加新变量按钮，弹出图 9-110 所示的 Add Time - History Variable 对话框。

选择 Y 方向位移，单击 OK 按钮，在弹出的图 9-111 所示 Node for Data 对话框中输入节点号 16，单击 OK 按钮。此时在 Time History Variables 对话框的变量列表中可以看到新添加的变量，如图 9-112 所示。请读者自己操作，练习添加变量，将节点 20 的数据添加进列表，结果应如图 9-112 所示。

单击 Time History Variables 对话框中的绘制曲线按钮，在工作区中绘制变量，如图 9-113 所示。

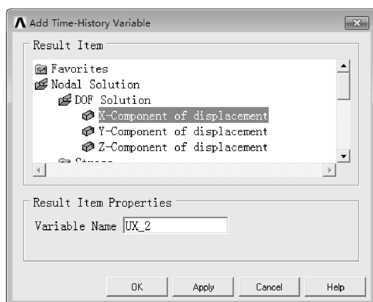


图 9-110　Add Time - History Variable 对话框

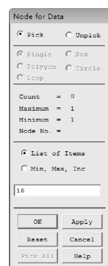


图 9-111　Node for Data 对话框

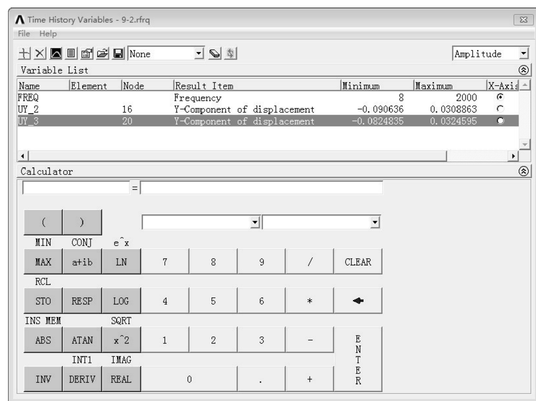


图 9-112　添加节点 20 的数据

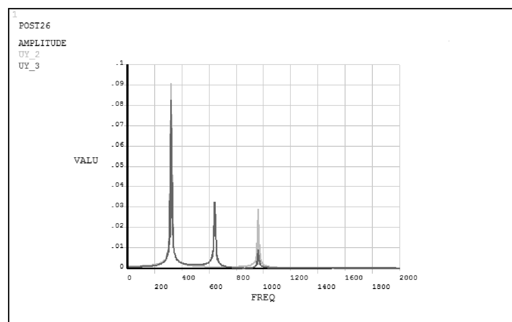
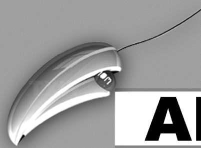


图 9-113　节点 16、20 在 Y 方向的位移 - 频率曲线

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined 命令，在弹出的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框中选择平移位移矢量，如图 9-114 所示。单击 OK 按钮，显示第 1 阶振型位移矢量图，如图 9-115 所示。

依次读取其后 4 阶结果，显示各阶振型位移矢量图，如图 9-116 ~ 图 9-119 所示。

单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出 Exit 对话框。选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS。



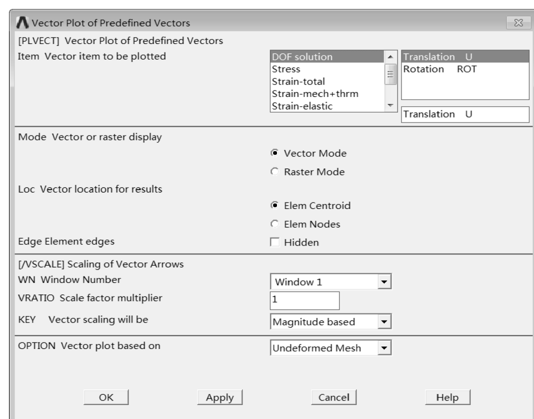


图 9-114 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

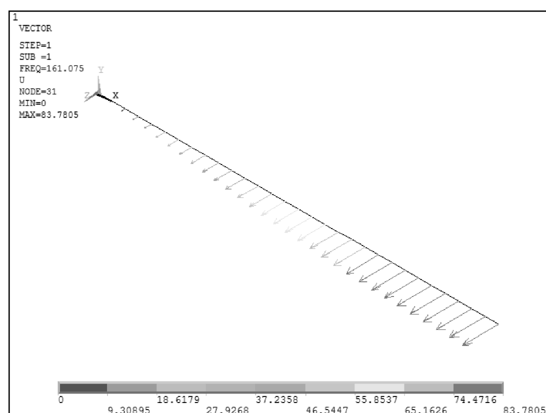


图 9-115 第 1 阶振型位移矢量图

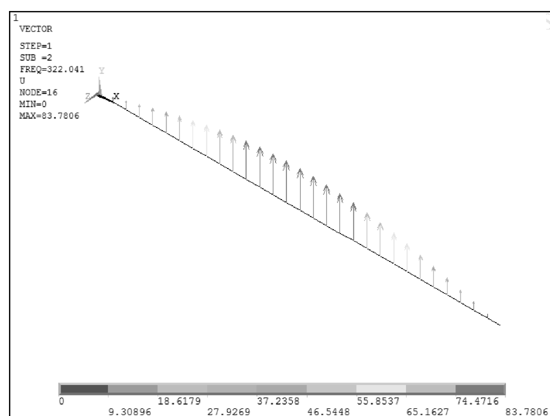


图 9-116 第 2 阶振型位移矢量图

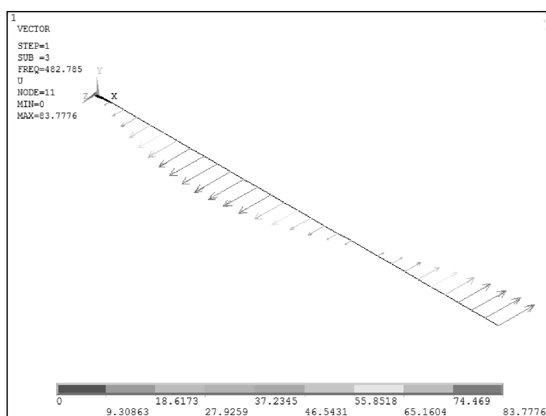


图 9-117 第 3 阶振型位移矢量图

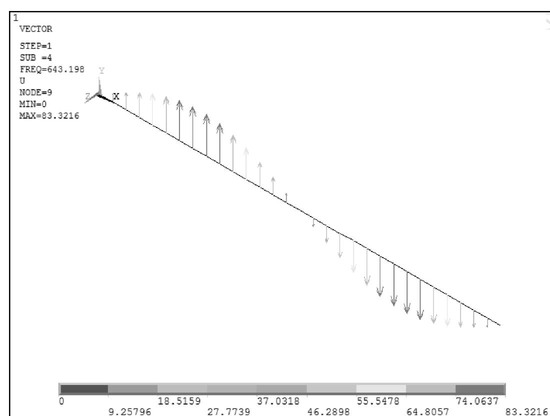


图 9-118 第 4 阶振型位移矢量图

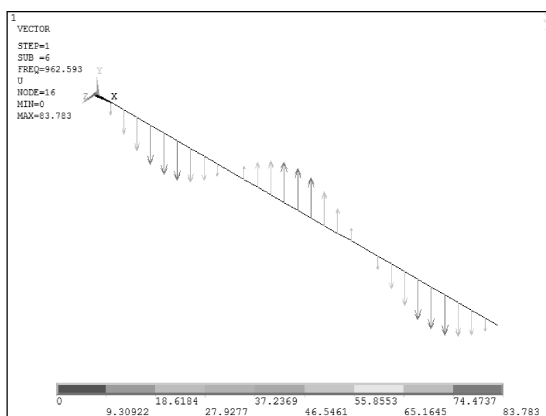


图 9-119 第 6 阶振型位移矢量图

9.4 ANSYS 瞬态动力学分析

瞬态动力学分析（亦称时间－历程分析）是用于确定承受任意的随时间变化荷载结构

的动力学响应的一种方法。可以用瞬态动力学分析确定结构在稳态荷载、瞬态荷载和简谐荷载的随意组合作用下的随时间变化的位移、应变、应力及力。荷载和时间的相关性使得惯性力和阻尼作用比较重要。如果惯性力和阻尼作用不重要，就可以用静力学分析代替瞬态分析。

瞬态动力学的基本运动方程是：

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}+[\boldsymbol{C}]\{\dot{\boldsymbol{u}}\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{u}\}=\{\boldsymbol{F}(t)\}$$

式中，$[\boldsymbol{M}]$ = 质量矩阵；

$[\boldsymbol{C}]$ = 阻尼矩阵；

$[\boldsymbol{K}]$ = 刚度矩阵；

$\{\ddot{\boldsymbol{u}}\}$ = 节点加速度向量；

$\{\dot{\boldsymbol{u}}\}$ = 节点速度向量；

$\{\boldsymbol{u}\}$ = 节点位移向量。

在任意给定的时间 t，这些方程可看作是一系列考虑了惯性力（$[M]\{\ddot{u}\}$）和阻尼力（$[C]\{\dot{u}\}$）的静力学平衡方程。ANSYS 程序使用 Newmark 时间积分方法在离散的时间点上求解这些方程，两个连续时间点间的时间增量称为积分时间步长。

9.4.1 瞬态动力学问题求解方法

瞬态动力学分析可采用 3 种方法：完全法、模态叠加法和缩减法。

1. 完全法

完全法采用完整的系统矩阵计算瞬态响应（没有矩阵缩减）。它是 3 种方法中功能最强的，允许包括各类非线性特性（塑性、大变形、大应变等）。如果不想包括任何非线性特性，应当考虑使用另外两种方法中的一种。这是因为完全法是 3 种方法中开销最大的一种。

完全法的优点：容易使用，不必关心如何选择主自由度或振型；允许各种类型的非线性特性；采用完整矩阵，不涉及质量矩阵近似；在一次分析就能得到所有的位移和应力；允许施加所有类型的荷载，还允许通过 TABLE 数组参数指定表边界条件；允许在实体模型上施加荷载。

完全法的缺点：比其他方法开销大。

2. 模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到的振型（特征值）乘上因子并求和来计算结构的响应。此法是 ANSYS/Professional 程序中唯一可用的瞬态动力学分析法。

模态叠加法的优点：对于许多问题，模态叠加法比缩减法或完全法更快、开销更小；只要模态分析不采用 PowerDynamics 方法，通过 LVSCALE 命令可将模态分析中施加的单元荷载引入到瞬态分析中；允许考虑模态阻尼（阻尼比作为振型号的函数）。

模态叠加法的缺点：整个瞬态分析过程中时间步长必须保持恒定，不允许采用自动时间步长；唯一允许的非线性是简单的点-点接触（间隙条件）；不能施加强制位移（非零）。

3. 缩减法

缩减法通过采用主自由度及缩减矩阵来压缩问题规模。在主自由度处的位移被计算出来后，ANSYS 可将解扩展到原有的完整自由度集上。

缩减法的优点：比完全法快且开销小。

缩减法的缺点：初始解只计算主自由度的位移，第 2 步进行扩展计算，得到完整空间上的位移、应力和力；不能施加单元荷载（压力、温度等），但允许施加加速度；所有荷载必

须加在用户定义的主自由度上（限制在实体模型上施加荷载）；整个瞬态分析过程中时间步长必须保持恒定，不允许采用自动时间步长；唯一允许的非线性是简单的点－点接触（间隙条件）。

9.4.2 曲柄滑块机构运动学分析

四杆机构是机构设计最为基础的内容。曲柄滑块机构是四杆机构的变形，本例将对其进行运动学分析，也就是瞬态动力学分析。

下面分析的是一常见的曲柄滑块机构，曲柄长 0.25 m，滑行跨度 0.62 m，偏心距 0.2 m，初始角位移 30°，角速度 2 rad/s，材料均为碳钢，不考虑摩擦，试对其进行瞬态动力学分析。

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Envivonment、Lisence、Working Directory，在 Job Name 框中输入项目名称 9－3，然后单击 Run 按钮进入 ANSYS 17.0 GUI 界面。

（2）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，在弹出的对话框中选择 COMBIN7，定义为 1 号单元；选择 BEAM188，定义为 2 号单元。

（3）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete 命令，参照前面实例介绍的步骤定义 1 号实常数，KX = 1E9、KY = 1E3、KZ = 1E3，单击 OK 按钮。

（4）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Beam > Common Sections 命令，在弹出的对话框中选择截面类型为 RECT（即矩形），设置长（B）与高（H）为 2E－2，单击 OK 按钮。

（5）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters 命令，弹出图 9-120 所示的 Scalar Parameters 对话框，输出如下参数，单击 OK 按钮。

```
PI = 3.1415926
R = 0.25
L = 0.62
E = 0.2
OMGA1 = 30
T = 60/OMGA1
FI0 = ASIN(E/(R + L))
AX = 0
AY = 0
BX = R * COS(FI0)
BY = -R * SIN(FI0)
CX = (R + L) * COS(FI0)
CY = -E
```

（6）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出图 9-121 所示的 Define Material Behavior 对话框，选择结构、线性、弹性、各向同性模型。

在弹出的图 9-122 所示 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框中，输入弹性模量与泊松比，然后单击 OK 按钮。选择 Density（密度属性），弹出图 9-123 所示的 Density for Material Number 1 对话框，设置材料密度为 1E－014。

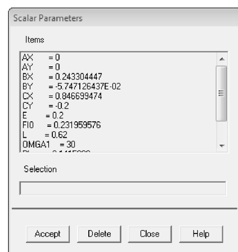


图 9-120 Scalar Parameters 对话框

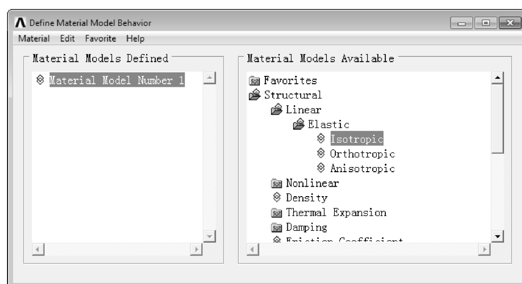


图 9-121 Define Material Behavior 对话框

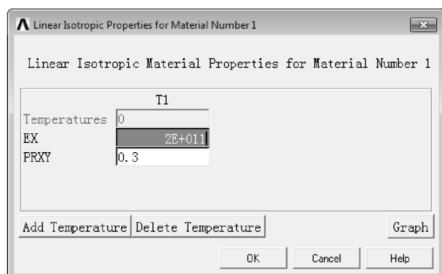


图 9-122 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

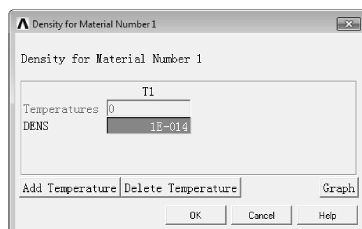


图 9-123 Density for Material Number 1 对话框

至此完成准备工作，开始定义模型。

（7）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS 命令，弹出图 9-124 所示的 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，输入节点编号与坐标，完成表 9-3 中所列出的节点定义。完成定义的节点如图 9-125 所示。

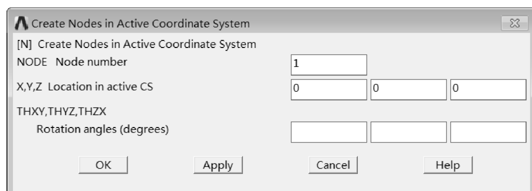


图 9-124 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框

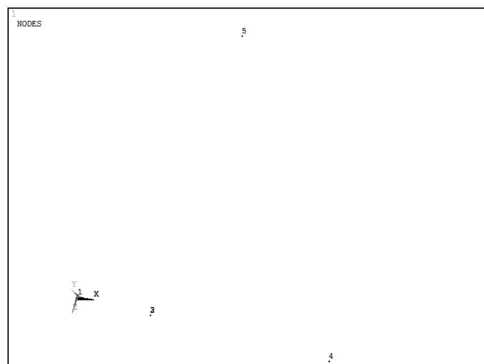


图 9-125 定义节点

表 9-3 节点列表

节点号	X	Y	Z
1	AX	AY	
2	BX	BY	
3	BX	BY	
4	CX	CY	
5	BX	BY	-1

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes 命令，弹出图 9-126 所示的 Element Attributes 对话框，选择单元编号为 1，实常数编号为 1，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes 命令，拾取 3、5 号关键点，单击 OK 按钮，完成单元定义，如图 9-127 所示。

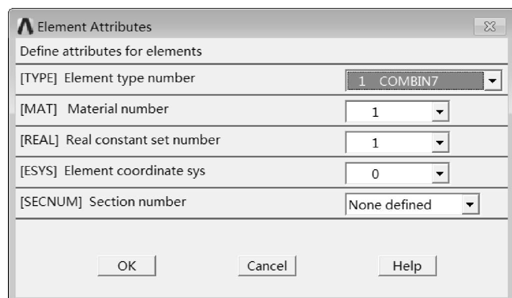


图 9-126 Element Attributes 对话框

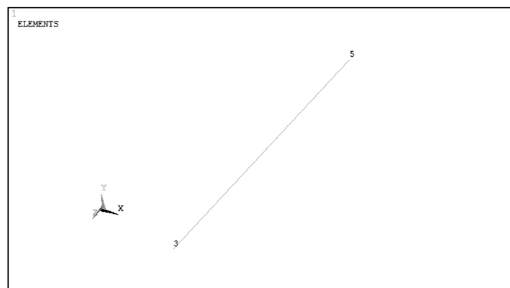


图 9-127 生成单元

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes 命令，弹出图 9-128 所示的 Element Attributes 对话框，选择单元编号为 2，实常数编号为 2，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes 命令，拾取 1、2 号关键点，单击 Apply 按钮；再拾取 3、4 号关键点，单击 OK 按钮，完成单元定义，如图 9-129 所示。

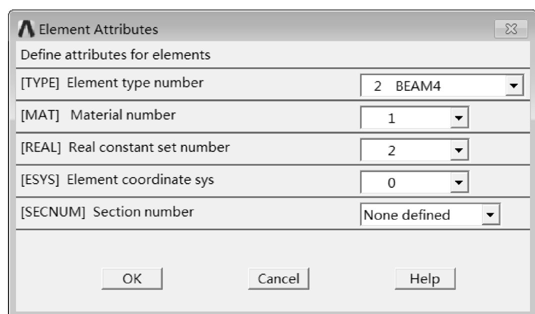


图 9-128 Element Attributes 对话框

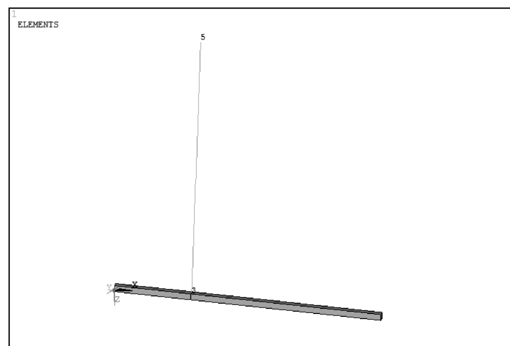


图 9-129 生成单元

（9）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 9-130 所示的 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Transient。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Basic 命令，在弹出的 Solution Controls 对话框中按图 9-131 所示进行设置，单击 OK 按钮。

（10）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，弹出图 9-132 所示的 Apply U,ROT on Nodes 对话框，选择约束 UZ，单击 OK 按钮，完成约束后如图 9-133 所示。

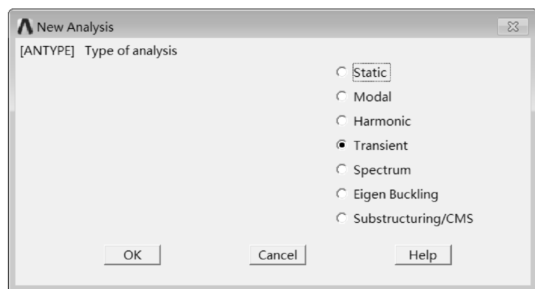


图 9-130　New Analysis 对话框

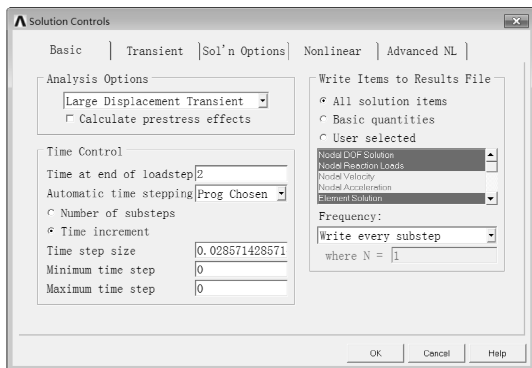


图 9-131　Solution Controls 对话框

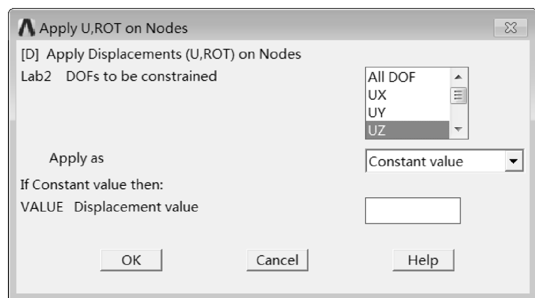


图 9-132　Apply U,ROT on Nodes 对话框（1）

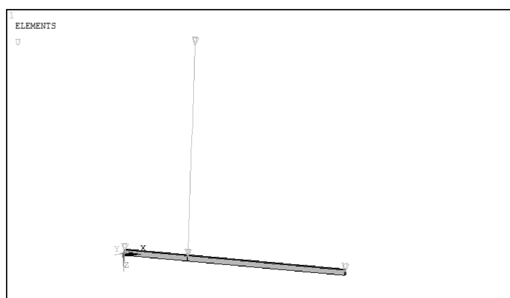


图 9-133　约束 Z 方向

（11）重复上述操作，约束全部节点的 X、Y 方向的转动自由度，如图 9-134 所示。

（12）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框。拾取 1 号节点，单击 OK 按钮，弹出如图 9-135 所示的 Apply U,ROT on Nodes 对话框，选择自由度为 ROTZ，设置位移量为 2 * PI，单击 Apply 按钮；再选择 UX、UY，设置位移量为 0，单击 OK 完成。

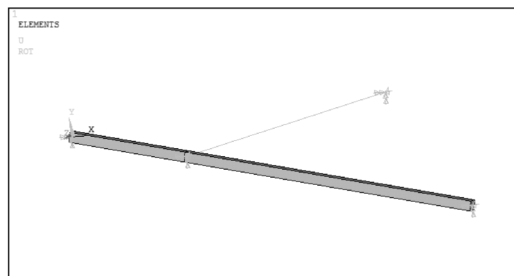


图 9-134　约束

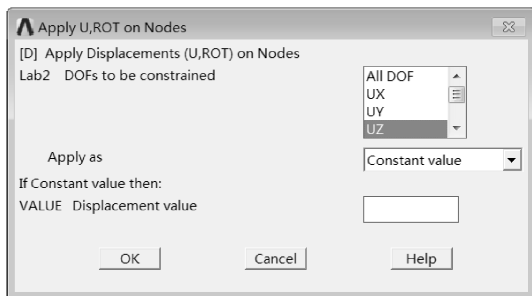


图 9-135　Apply U,ROT on Nodes 对话框（2）

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，拾取 4 号节点，约束 UY。

完成约束的模型如图 9-136 所示。

（13）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，在弹出的如图 9-137 所示/STATUS Command 窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

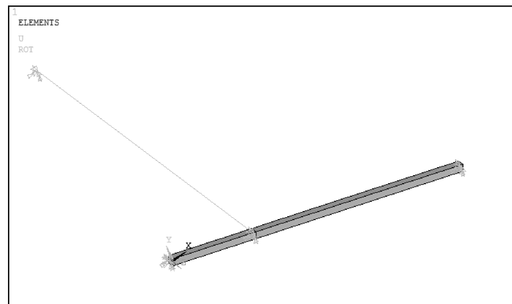


图 9-136 完整约束

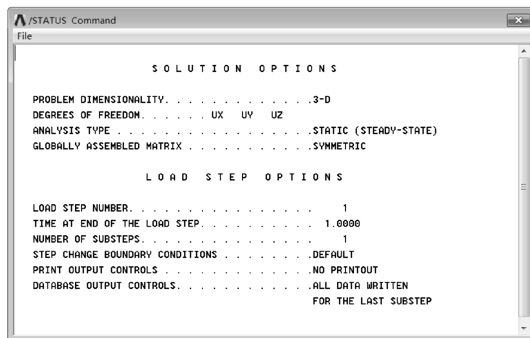


图 9-137 /STATUS Command 窗口

同时弹出的还有图 9-138 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明求解完成。

本例也可以使用命令流完成操作。

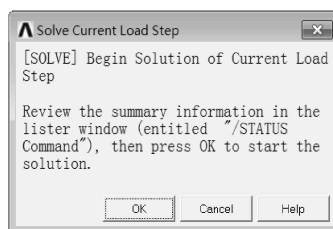


图 9-138 Solve Current Load Step 对话框

```
FINI                                        ! 清空
/CLE                                        !

/PREP7                                      ! 进入前处理器
PI = 3.1415926                              ! 定义参数
R = 0.25                                    !
L = 0.62                                    !
E = 0.2                                     !
OMGA1 = 30                                  !
T = 60/OMGA1                                !
FI0 = ASIN(E/(R + L))                       !
AX = 0                                      !
AY = 0                                      !
BX = R * COS(FI0)                           !
BY = - R * SIN(FI0)                         !
CX = (R + L) * COS(FI0)                     !
CY = - E                                    !

ET,1,COMBIN7                                ! 单元类型
ET,2,BEAM4                                  !
MP,EX,1,2E11                                ! 材料属性
MP,PRXY,1,0.3                               !
MP,DENS,1,1E-14                             !
R,1,1E9,1E3,1E3,0                           ! 实常数
R,2,4E-4,1.3333E-8,1.3333E-8,0.02,0.02      !

N,1,AX,AY                                   ! 定义节点
N,2,BX,BY                                   !
N,3,BX,BY                                   !
N,4,CX,CY                                   !
N,5,BX,BY,-1                                !
```

```
TYPE,1                                  ! 选择单元类型
REAL,1                                  !
E,3,5                                   ! 生成单元
TYPE,2                                  ! 更改单元类型
REAL,2                                  !
E,1,2                                   ! 生成单元
E,3,4                                   !
FINISH                                  !
                                        !
/SOLU                                   ! 进入求解器
ANTYPE,TRANS                            ! 定义分析类型
NLGEOM,ON                               ! 打开大变形开关
DELTIM,T/70                             ! 定义时间步长
KBC,0                                   ! 斜坡加载
TIME,T                                  ! 定义时间
OUTRES,ALL,ALL                          ! 输出控制
CNVTOL,F,1,0.1                          ! 力收敛准则
CNVTOL,M,1,0.1                          ! 力矩收敛准则

D,ALL,UZ                                ! 定义约束
D,ALL,ROTX                              !
D,ALL,ROTY                              !
D,1,ROTZ,2*PI                           ! 施加角位移
D,1,UX                                  !
D,1,UY                                  !
D,4,UY                                  !

SOLVE                                   ! 求解
SAVE                                    ! 保存
FINISH                                  !
```

（14）完成求解后，即可进行后处理。运行如下后处理命令，绘制曲线。

```
/POST26                 ! 进入时间历程后处理器进行分析
NSOL,2,4,U,X            ! 所取位移节点解
DERIV,3,2,1             ! 求导数
DERIV,4,3,1             ! 求导数
PLVAR,2                 ! 绘制曲线
PLVAR,3                 !
PLVAR,4                 !
FINISH                  !
```

图 9-139 所示为 4 号节点的位移曲线，图 9-140 所示为 4 号节点速度曲线，如图 9-141 所示为 4 号节点加速度曲线。

（15）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 9-142 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择 Displacement vector sum（位移矢量和），单击 OK 按钮，显示初始位移云图，如图 9-143 所示。

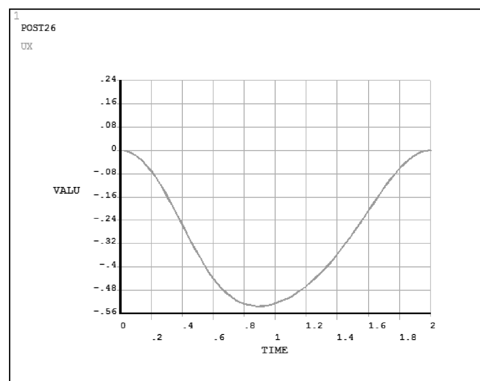
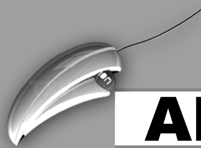


图 9-139　4 号节点位移曲线



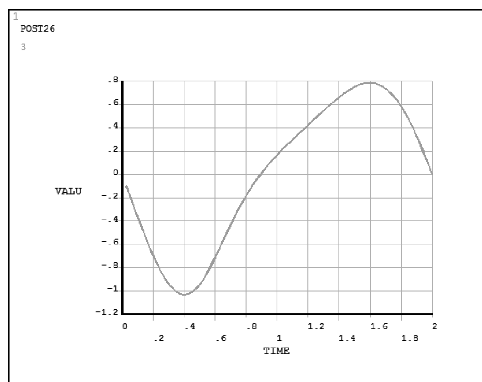


图 9-140　4 号节点速度曲线

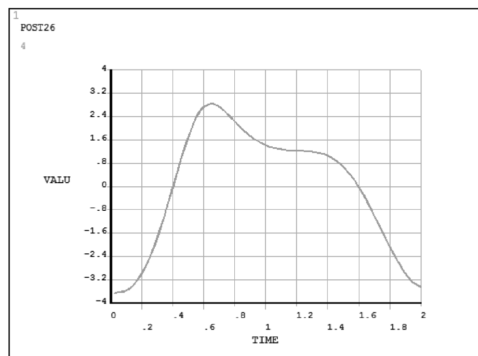


图 9-141　4 号节点加速度曲线

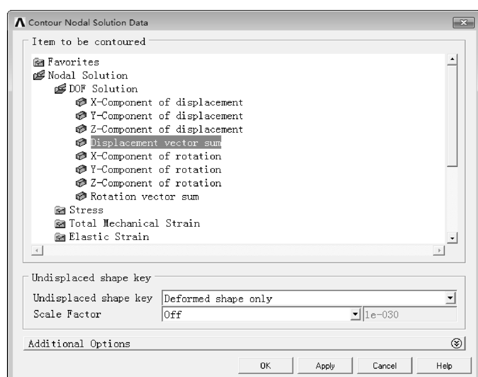


图 9-142　Contour Nodal Solution Data 对话框

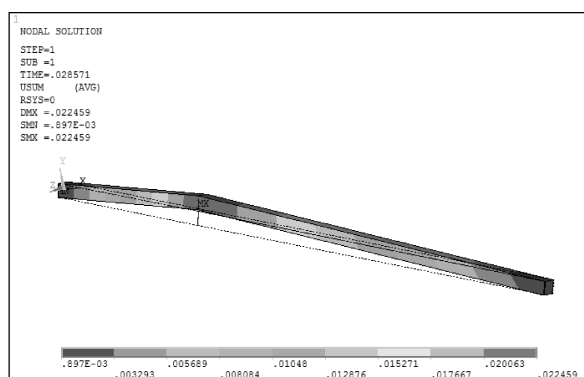


图 9-143　初始位移云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > Next Set 命令，依次读取其后 4 阶结果，显示各时期位移云图，如图 9-144 ~ 图 9-147 所示。

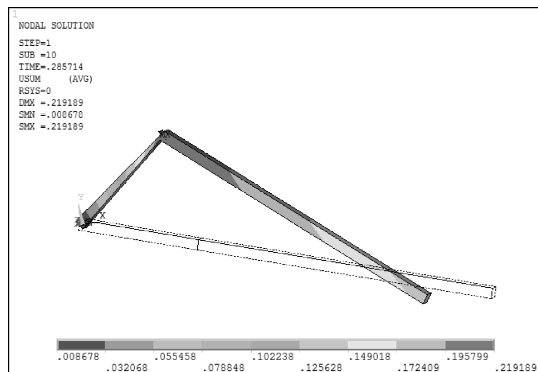


图 9-144　第 10 子步位移云图

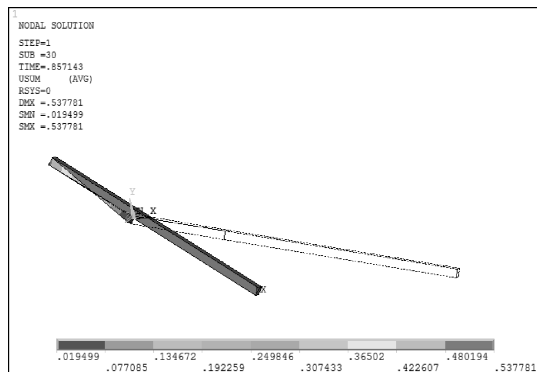


图 9-145　第 30 子步位移云图

（16）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > First Set 命令，读入第 1 阶的结果。在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 9-148 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择第 1 主应力，单击 OK 按钮，显示初始应力云图，如图 9-149 所示。

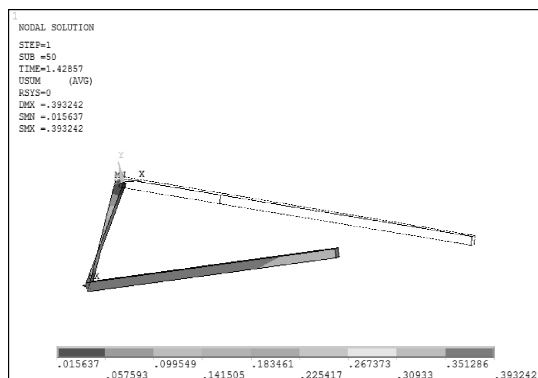


图 9-146 第 50 子步位移云图

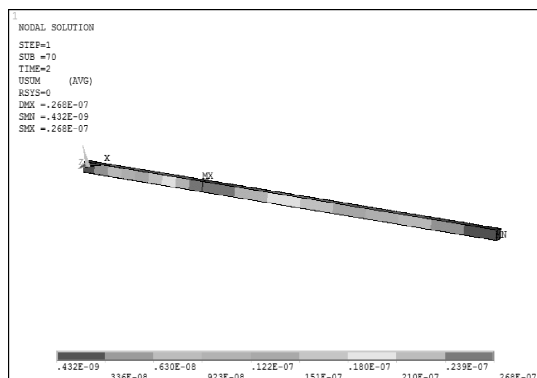


图 9-147 第 70 子步位移云图

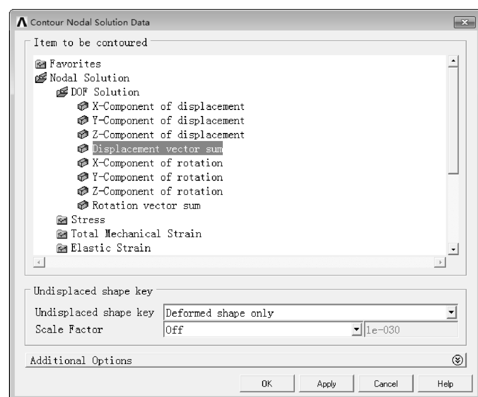


图 9-148 Contour Nodal Solution Data 对话框

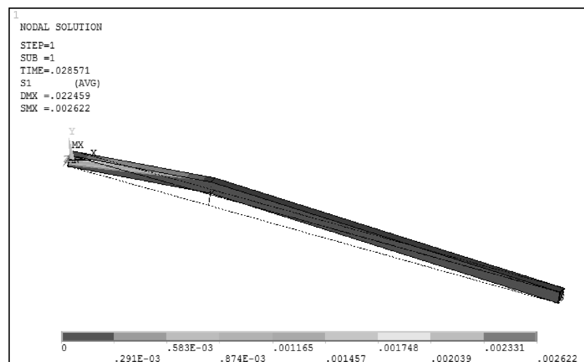


图 9-149 初始应力云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > Next Set 命令，依次读取其后各阶结果，显示各时期应力云图，如图 9-150 ~ 图 9-153 所示。

单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出 Exit 对话框。选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS。

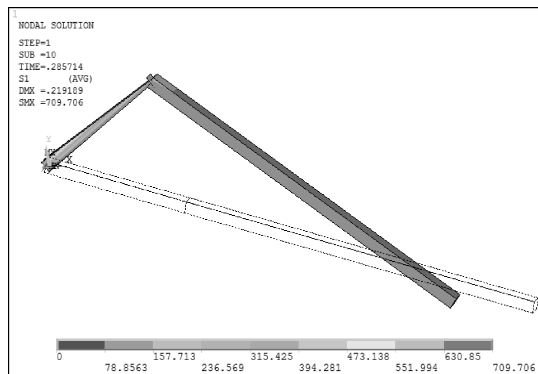


图 9-150 第 10 子步应力云图

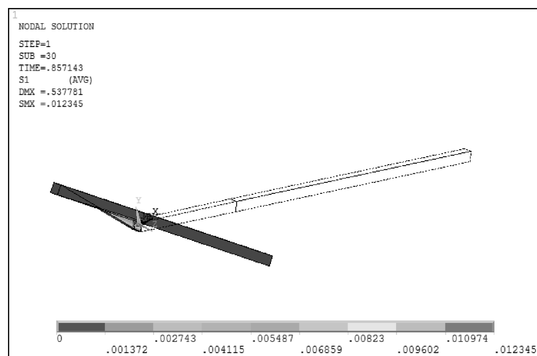


图 9-151 第 30 子步应力云图

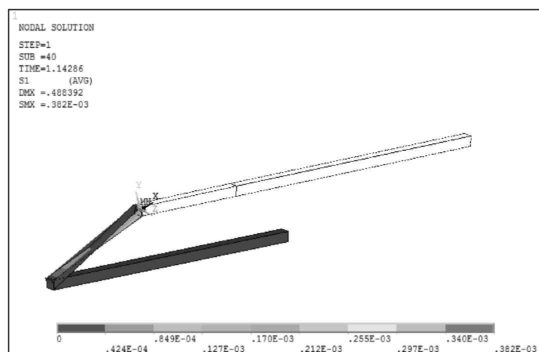


图 9-152 第 40 子步应力云图

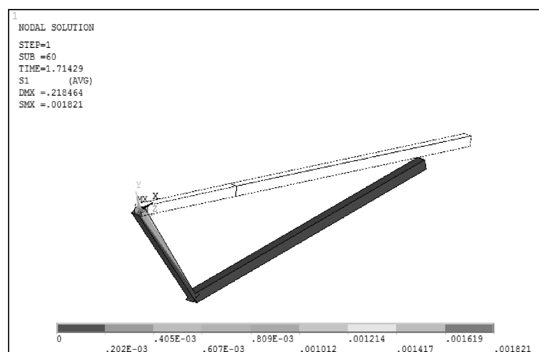


图 9-153 第 60 子步应力云图

9.5 本章小结

本章为读者介绍了 ANSYS 结构动力学分析。实际工程中动荷载远比静荷载常见，只能进行静力学分析是远远不够的。ANSYS 可以进行模态分析、瞬态动力学分析、谐响应分析、谱分析等。与静力学分析不同，在动力学分析中用户要注意时间变化的影响，还要考虑阻尼与惯性的因素。

模态分析用于确定分析对象的振动特性——固有频率与振型，这是动态分析设计中的重要参数，其他的动力学分析也是以模态分析为基础的。

谐响应分析是用于确定线性结构在承受随时间按简谐规律变化的荷载时的稳态响应的一种技术。任何持续的周期荷载都将在结构系统中产生持续的周期响应，进行谐响应分析是为了计算不同频率下结构的响应，通常是求解位移响应，分析结构的抗共振、抗疲劳的特性。

瞬态动力学分析也叫时间 - 历程分析，可以确定在时间尺度上分析对象对荷载的动力学响应。通常可以获得分析对象的运动学参数，也可提取动力学参数。如果惯性力与阻尼的影响并不是重要分析目标，则建议采用静力学分析，以降低计算成本。



第 10 章　加工过程仿真分析

金属热加工是应用非常广泛的加工方法。进行热加工的金属由于温度、受力等均为极端环境，加工过程是否会导致工件或工具损伤、完成加工后是否有应力残留等问题，在 ANSYS 中均可以进行仿真分析。ANSYS 的热分析功能即在此场合发挥其作用。

热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数，如热量的获取或损失、热梯度、热流密度（热通量）等。热分析在许多工程应用中扮演着重要的角色，如内燃机、涡轮机、换热器、管路系统、电子元件等。

在 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/Mechanical、ANSYS/Thermal、ANSYS/FLOTRAN、ANSYS/ED 5 种产品中均包含热分析功能，其中 ANSYS/FLOTRAN 不含相变热分析。ANSYS 热分析基于由能量守恒原理导出的热平衡方程，用有限元法计算各节点的温度，并导出其他热物理参数。ANSYS 热分析可以针对热传导、热对流及热辐射 3 种热传递方式进行处理。此外，它还可以分析相变、有内热源、接触热阻等问题。

ANSYS 热分析分为两大类，即传统的热分析和热耦合分析。

- 依据温度场与时间的变化关系，传统的热分析可以分为两种，即稳态传热分析和瞬态传热分析。所谓稳态传热，就是系统的温度场不随时间变化；瞬态传热，就是系统的温度场随时间明显变化。
- 热耦合分析，就是将热分析与其他类型的分析结合起来进行分析。ANSYS 支持的热耦合分析包括：热－结构耦合分析、热－流体耦合分析、热－电耦合分析、热－磁耦合分析、热－电－磁－结构耦合分析。

本章将介绍一些热分析的基础知识，设计人员应使用这些基础知识作为判断 ANSYS 计算结果的依据。

本章学习目标

- 了解 ANSYS 热分析的基础知识
- 掌握进行稳态传热分析的方法
- 掌握进行瞬态传热分析的方法
- 了解相变问题的分析方法
- 掌握热应力求解的方法

10.1　热力学基础知识

在进行实例介绍之前，先介绍一些有关热力学的基础知识。在此只介绍一些最基本的与

本书讲解内容相关的知识，希望读者参考相关书籍，深入理解专业知识，为判断分析结果、分析误差打下牢固的基础。

10.1.1 符号与单位

热分析涉及的单位制见表10-1。

表10-1 热分析单位

项　　目	国际单位	英制单位	ANSYS代号
长度	m	ft	
时间	s	s	
质量	kg	lbm	
温度	℃	°F	
力	N	lbf	
能量（热量）	J	BTU	
功率（热流率）	W	BTU/sec	
热流密度	W/m^2	$BTU/sec-ft^2$	
生热速率	W/m^3	$BTU/sec-ft^3$	
导热系数	W/m-℃	BTU/sec-ft-°F	KXX
对流系数	W/m^2-℃	$BTU/sec-ft^2$-°F	HF
密度	kg/m^3	lbm/ft^3	DENS
比热	J/kg-℃	BTU/lbm-°F	C
焓	J/m^3	BTU/ft^3	ENTH

10.1.2 传热学经典理论回顾

热分析遵循热力学第一定律，即能量守恒定律。

对于一个封闭的系统（没有质量的流入或流出）：

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

式中，Q为热量；W为作功；ΔU为系统内能；ΔKE为系统动能；ΔPE为系统势能。

对于大多数工程传热问题：

$$\Delta KE = \Delta PE = 0$$

通常考虑没有做功，即$W=0$，则：

$$Q = \Delta U$$

对于稳态热分析：

$$Q = \Delta U = 0$$

即流入系统的热量等于流出的热量。

对于瞬态热分析：

$$q = \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}$$

即流入或流出的热传递速率q等于系统内能的变化。



10.1.3 热传递的方式

1. 热传导

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能的交换。热传导遵循傅里叶定律：

$$q^n = -k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$$

式中，q^n：热流密度（W/m^2）；

k：导热系数（W/(m－℃)）；

“－”：热量流向温度降低的方向。

2. 热对流

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间，由于温差的存在引起的热量的交换。热对流可以分为两类：自然对流和强制对流。热对流用牛顿冷却方程来描述：

$$q^n = h(T_s - T_B)$$

式中，h 为对流换热系数（或称膜传热系数、给热系数、膜系数等）；T_s为固体表面的温度；T_B为周围流体的温度。

3. 热辐射

热辐射指物体发射电磁能，并被其他物体吸收转变为热的热量交换过程。物体温度越高，单位时间内辐射的热量越多。热传导和热对流都需要有传热介质，而热辐射无需任何介质。实际上，真空中的热辐射效率最高。

在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射，系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬－波尔兹曼方程来计算：

$$q = \varepsilon\sigma A_1 F_{12}(T_1^4 - T_2^4)$$

式中，q 为热流率；ε 为辐射率（黑度）；σ 为斯蒂芬－波尔兹曼常数，约为 5.67×10^{-8} W/m^2·K^4；A_1为辐射面 1 的面积；F_{12}为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数；T_1为辐射面 1 的绝对温度；T_2为辐射面 2 的绝对温度。

由上式可以看出，包含热辐射的热分析是高度非线性的。

4. 稳态传热

如果系统的净热流率为 0，即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量（$q_{流入} + q_{生成} - q_{流出} = 0$），则系统处于热稳态。在稳态热分析中，任一节点的温度不随时间变化。稳态热分析的能量平衡方程为（以矩阵形式表示）：

$$[\boldsymbol{K}]\{T\} = \{Q\}$$

式中，$[\boldsymbol{K}]$为传导矩阵，包含导热系数、对流系数、辐射率及形状系数；$\{\boldsymbol{T}\}$为节点温度向量；$\{\boldsymbol{Q}\}$为节点热流率向量，包含热生成。

ANSYS 利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件，生成$[\boldsymbol{K}]$、$\{\boldsymbol{T}\}$以及$\{\boldsymbol{Q}\}$。

5. 瞬态传热

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程。在这个过程中，系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理，瞬态热平衡可以表达为

（以矩阵形式表示）：

$$[\boldsymbol{C}]\{\dot{T}\}+[\boldsymbol{K}]\{T\}=\{\boldsymbol{Q}\}$$

式中，$[\boldsymbol{K}]$为传导矩阵，包含导热系数、对流系数、辐射率及形状系数；$[\boldsymbol{C}]$为比热矩阵，考虑系统内能的增加；$\{\boldsymbol{T}\}$为节点温度向量；$\{\dot{T}\}$为温度对时间的导数；$\{\boldsymbol{Q}\}$为节点热流率向量，包含热生成。

10.1.4 线性与非线性

如果有下列情况产生，则为非线性热分析。

- 材料热性能随温度变化，如 $\boldsymbol{K}(T)$、$\boldsymbol{C}(T)$等。
- 边界条件随温度变化，如 $h(T)$等。
- 含有非线性单元。
- 考虑辐射传热。

非线性热分析的热平衡矩阵方程为：

$$[\boldsymbol{C}(T)]\{\dot{T}\}+[\boldsymbol{K}(T)]\{T\}=\{Q(T)\}$$

式中各参数含义同上。

10.1.5 边界条件、初始条件

ANSYS 热分析的边界条件或初始条件可分为 7 种：温度、热流率、热流密度（热通量）、对流、热辐射、绝热量、热生成率。

10.1.6 热分析误差估计

热分析误差估计的特点如下。

- 仅用于评估由于网格密度不够带来的误差。
- 仅适用于 SOLID 或 SHELL 的热单元（只有温度一个自由度）。
- 基于单元边界的热流密度的不连续。
- 仅对一种材料、线性、稳态热分析有效。
- 使用自适应网格划分可以对误差进行控制。

10.2 焊接过程仿真

焊接是指将两种或两种以上相同或不同物质的工件，通过加热、加压或两者并用，用或不用填充材料，使其达到原子或分子间的结合和扩散而形成永久性连接的工艺过程。

本节将结合实例对金属的焊接过程进行有限元分析，利用生死单元技术并配合 ANSYS 可以分析相变过程的强大分析能力，模拟焊接的焊缝连接过程。

10.2.1 概述

焊接过程中，工件和焊料熔化形成熔融区域，熔池冷却凝固后便形成材料之间的连接。

这一过程中，通常还需要施加压力。焊接的能量来源有很多种，包括气体焰、电弧、激光、电子束、摩擦和超声波等。19 世纪末之前，唯一的焊接工艺是铁匠沿用了数百年的金属锻焊。最早的现代焊接技术出现在 19 世纪末，先是弧焊和氧燃气焊，稍后出现了电阻焊。20 世纪早期，随着第一次和第二次世界大战开战，对军用器材廉价、可靠的连接方法需求极大，故促进了焊接技术的发展。今天，随着焊接机器人在工业领域中的广泛应用，研究人员仍在深入研究焊接的本质，继续开发新的焊接方法，以进一步提高焊接质量。

1. 焊接过程的物理本质

焊接是将两种或两种以上相同或不同物质的工件，通过原子或分子之间的结合和扩散连接成一体的工艺过程。促使原子或分子之间产生结合和扩散的方法是加热、加压或同时加热又加压。

2. 焊接的分类

金属的焊接，按其工艺过程的特点分为熔焊、压焊和钎焊三大类。

（1）熔焊是在焊接过程中将工件接口加热至熔化状态，不加压力完成焊接的方法。熔焊时，热源将待焊两工件接口处迅速加热熔化，形成熔池。熔池随热源向前移动，冷却后形成连续焊缝而将两工件连接成一体。在熔焊过程中，如果大气与高温的熔池直接接触，大气中的氧就会氧化金属和各种合金元素。大气中的氮、水蒸气等进入熔池，还会在随后冷却过程中在焊缝中形成气孔、夹渣、裂纹等缺陷，恶化焊缝的质量和性能。为了提高焊接质量，人们研究出了各种保护方法。例如，气体保护电弧焊就是用氩、二氧化碳等气体隔绝大气，以保护焊接时的电弧和熔池率；又如钢材焊接时，在焊条药皮中加入对氧亲和力大的钛铁粉进行脱氧，就可以保护焊条中有益元素锰、硅等免于氧化而进入熔池，冷却后获得优质焊缝。

（2）压焊是在加压条件下，使两工件在固态下实现原子间结合，又称固态焊接。常用的压焊工艺是电阻对焊，当电流通过两工件的连接端时，该处因电阻很大而温度上升，当加热至塑性状态时，在轴向压力作用下连接成一体。各种压焊方法的共同特点是在焊接过程中施加压力而不加填充材料。多数压焊方法如扩散焊、高频焊、冷压焊等都没有熔化过程，因而没有像熔焊那样的有益合金元素烧损、有害元素侵入焊缝的问题，从而简化了焊接过程，也改善了焊接安全卫生条件。同时由于加热温度比熔焊低、加热时间短，因而热影响区小。许多难以用熔焊焊接的材料，往往可以用压焊焊成与母材同等强度的优质接头。

（3）钎焊是使用比工件熔点低的金属材料做钎料，将工件和钎料加热到高于钎料熔点、低于工件熔点的温度，利用液态钎料润湿工件，填充接口间隙并与工件实现原子间的相互扩散，从而实现焊接的方法。

焊接时形成的连接两个被焊接体的接缝称为焊缝。焊缝的两侧在焊接时会受到焊接热作用，而发生组织和性能变化，这一区域被称为热影响区。焊接时因工件材料、焊接材料、焊接电流等不同，焊后在焊缝和热影响区可能会产生过热、脆化、淬硬或软化现象，从而使焊件性能下降，恶化焊接性。这就需要调整焊接条件，焊前对焊件接口处预热、焊时保温和焊后热处理可以改善焊件的焊接质量。

另外，焊接是一个局部的迅速加热和冷却过程，焊接区由于受到四周工件本体的拘束而不能自由膨胀和收缩，冷却后在焊件中便产生焊接应力和变形。对于重要的产品，焊后都需要消除焊接应力，矫正焊接变形。

现代焊接技术已能焊出无内外缺陷的、机械性能等于甚至高于被焊接体的焊缝。被焊接体在空间的相互位置称为焊接接头。接头处的强度除受焊缝质量影响外，还与其几何形状、尺寸、受力情况和工作条件等有关。图 10–1 所示为现代工程中使用的自动焊接机。


图 10–1　自动焊接机

接头的基本形式有对接、搭接、丁字接（正交接）和角接等。

（1）对接接头焊缝的横截面形状，决定于被焊接体在焊接前的厚度和两接边的坡口形式。焊接较厚的钢板时，为了焊透会在接边处开出各种形状的坡口，以便较容易地送入焊条或焊丝。坡口形式有单面施焊的坡口和两面施焊的坡口。选择坡口形式时，除保证焊透外，还应考虑施焊方便、填充金属量少、焊接变形小和坡口加工费用低等因素。厚度不同的两块钢板对接时，为避免截面急剧变化引起严重的应力集中，常把较厚的板边逐渐削薄，达到两接边处等厚。对接接头的静强度和疲劳强度比其他接头高。交变、冲击荷载下或低温高压容器中工件的连接，常优先采用对接接头的焊接。

（2）搭接接头的焊前准备工作简单，装配方便，焊接变形和残余应力较小，因而在工地安装接头和不重要的结构上时常采用。一般来说，搭接接头不适于在交变荷载、腐蚀介质、高温或低温等条件下工作。

（3）采用丁字接头和角接接头通常是由于结构上的需要。丁字接头上未焊透的角焊缝工作特点与搭接接头的角焊缝相似，当焊缝与外力方向垂直时便成为正面角焊缝，这时焊缝表面形状会引起不同程度的应力集中；焊透的角焊缝受力情况与对接接头相似。

（4）角接接头承载能力低，一般不单独使用，只有在焊透或内外均有角焊缝时才会令焊件性能有所改善，多用于封闭形结构的拐角处。

常见的焊缝形式如图 10–2 所示。

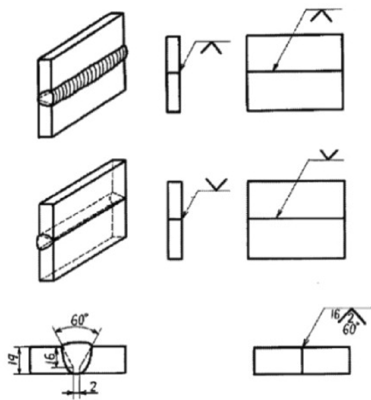


图 10–2　常见的焊缝形式

焊接的优点如下：

- 焊接产品比铆接件、铸件和锻件重量轻，对于交通运输工具来说可以减轻自重，节约能量。焊接的密封性好，适于制造各类容器。
- 发展联合加工工艺，使焊接与锻造、铸造相结合，可以制成大型、经济合理的铸焊结构和锻焊结构，经济效益很高。
- 采用焊接工艺能有效利用材料。焊接结构可以在不同部位采用不同性能的材料，充分发挥各种材料的特长，达到经济、优质。

焊接已成为现代工业中一种不可缺少且日益重要的加工工艺方法。在近代的金属加工中，焊接比铸造、锻压工艺发展得晚，但发展速度很快。焊接结构的重量约占钢材产量的 45%，铝和铝合金焊接结构的比重也在不断增加。

未来的焊接工艺，一方面要研制新的焊接方法、焊接设备和焊接材料，以进一步提高焊接质量和安全可靠性，如改进现有电弧、等离子弧、电子束、激光等焊接能源；运用电子技术和控制技术，改善电弧的工艺性能，研制可靠、轻巧的电弧跟踪方法。另一方面要提高焊

接机械化和自动化水平，如焊机实现程序控制、数字控制；研制从准备工序、焊接到质量监控全部过程自动化的专用焊机；在自动焊接生产线上，推广、扩大数控的焊接机械手和焊接机器人，提高焊接生产水平，改善焊接卫生安全条件。

不同焊接工艺的分类见表 10-2。

表 10-2　焊接工艺分类

<table>
<tr><td rowspan="12">焊接</td><td rowspan="5">熔焊</td><td colspan="2">气焊</td></tr>
<tr><td rowspan="2">电弧焊</td><td>手工电弧焊</td></tr>
<tr><td>自动电弧焊</td></tr>
<tr><td colspan="2">电渣焊</td></tr>
<tr><td colspan="2">等离子焊</td></tr>
<tr><td rowspan="4">压焊</td><td rowspan="3">电阻焊</td><td>对焊</td></tr>
<tr><td>点焊</td></tr>
<tr><td>缝焊</td></tr>
<tr><td colspan="2">摩擦焊</td></tr>
<tr><td rowspan="3">钎焊</td><td colspan="2">烙铁钎焊</td></tr>
<tr><td colspan="2">盐浴钎焊</td></tr>
<tr><td colspan="2">火焰钎焊</td></tr>
</table>

本例将要分析的为普通熔焊过程，非钎焊，即焊缝材料与工件材料相同。

10.2.2 分析过程

（1）首先定义单元及材料参数。运行如下命令。

```
fini                              !
/cle
/prep7
et,1,13,4                         ! 定义单元类型
et,2,13,4
```

定义单元类型的同时指定了单元的 KEYOPTION 选项，将 K1 设置为 4，即定义可用的自由度有 UX、UY、TEMP、AZ，如图 10-3 所示。

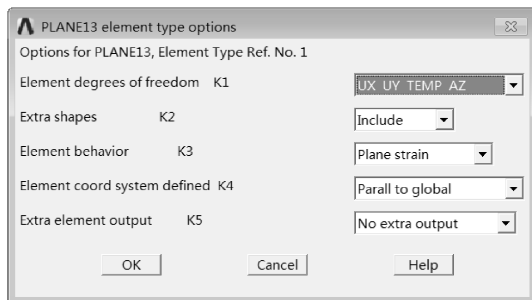


图 10-3　单元 KEYOPTION 选项

继续运行如下命令定义材料模型。

```
mp,kxx,1,.246e-3          ! 定义材料导热系数

mp,kxx,2,.246e-3          !
mp,kxx,3,.246e-3          !
mp,c,1,.2                 ! 定义材料比热容
mp,c,2,.2                 !
mp,c,3,.2                 !
mp,dens,1,.2833           ! 定义材料密度
mp,dens,2,.2833           !
mp,dens,3,.2833           !
mp,alpx,1,6.5e-6          ! 定义材料线膨胀系数
mp,alpx,2,6.5e-6          !
mp,alpx,3,6.5e-6          !
mp,murx,1,1               ! 相对渗透率
mp,murx,2,1               !
mp,murx,3,1               !
mp,reft,1,3000            ! 定义材料参考渡
mp,reft,2,1550            !
mp,reft,3,100             !
```

完成定义后的材料模型如图 10-4 所示。

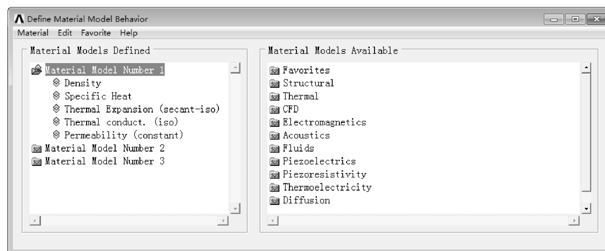


图 10-4　定义 3 种材料模型

（2）定义完单元与材料参数后，开始建立模型。本例采用直接建立有限元模型的方法，选定节点，再将节点直接连接成单元。运行如下命令定义节点。

```
n,1
n,2,,.39
n,3,,.41
n,4,,.79
n,5,,.81
n,6,,1.2
n,7,.2
n,8,.1,.39
n,9,.1,.41
n,10,.1,.79
n,11,.1,.81
n,12,.2,1.2
n,13,.22
n,14,.12,.40
n,15,.12,.80
n,16,.22,1.2
n,17,.6
n,18,.6,.4
n,19,.6,.8
n,20,.6,1.2
```

生成的节点如图 10-5 所示。

继续运行如下命令。

```
ngen,10,4,17,20,1,.6
```

NGEN 命令将 17、18、19、20 四个节点沿 X 正方向复制 10 次，间距为 0.6。完成复制的节点如图 10-6 所示。

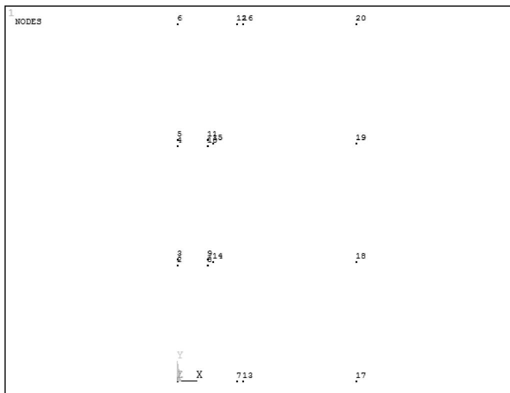


图 10-5 生成节点

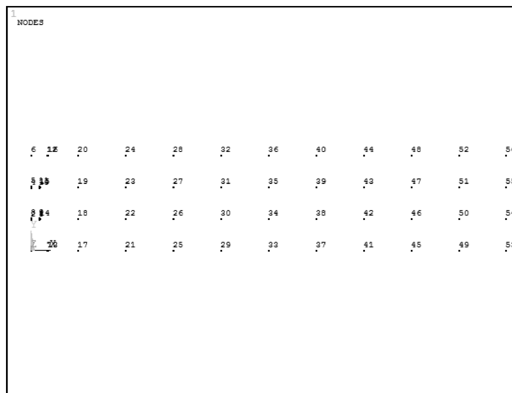


图 10-6 节点阵列

（3）定义节点完成后，就可以通过节点生成单元。运行如下命令。

```
type,1          ! 单元类型 1
mat,1           ! 材料模型 1
```

选择单元类型 1 与材料模型 1，用于定义单元。运行如下命令。

```
e,1,7,8,2
```

将节点 1、7、8、2 连接围成单元，如图 10-7 所示。

继续运行如下命令。

```
egen,5,1,-1
```

生成剩余的焊缝部分的单元，如图 10-8 所示。

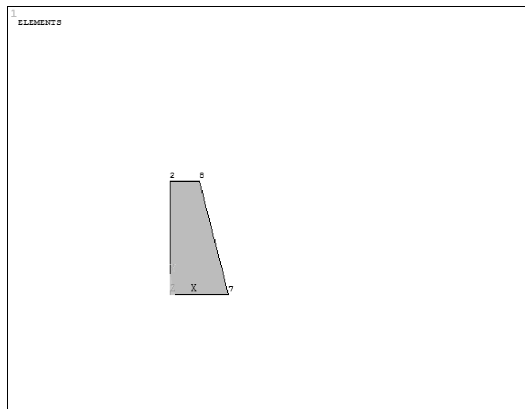


图 10-7 生成单元

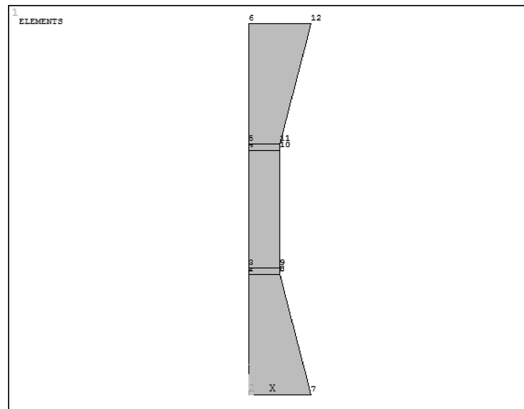


图 10-8 焊缝

（4）运行如下命令。

```
mat,2
```

将材料改为2。继续运行如下命令。

```
e,7,13,14,8
e,8,14,9,9
e,9,14,15,10
e,10,15,11,11
e,11,15,16,12
```

生成单元如图10-9所示。

运行如下命令，生成钢板的单元。

```
type,2                    ！定义生成的单元类型
mat,3
e,13,17,18,14
egen,3,1,-1
egen,10,4,-3
```

生成的有限元模型如图10-10所示。

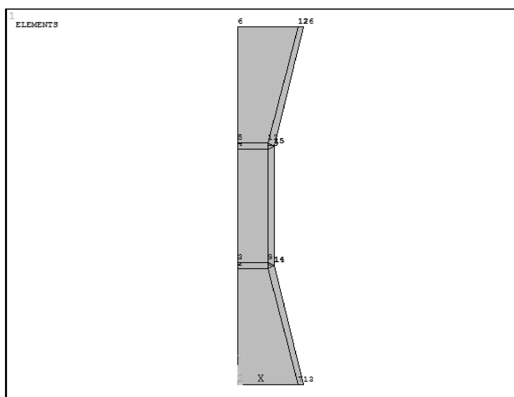


图10-9　生成焊缝边上的单元

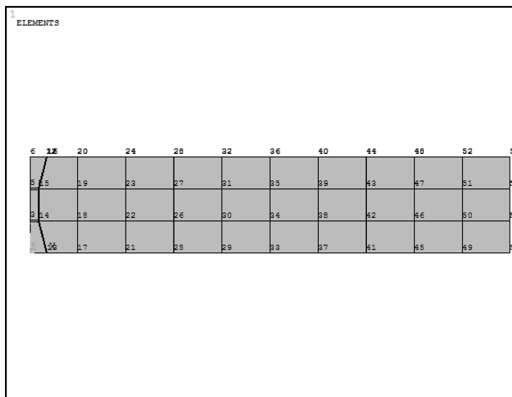


图10-10　生成的有限元模型

（5）完成模型建立后即可开始加载。先定义约束。

```
d,1,ux,0            ！定义约束
d,2,ux,0
d,3,ux,0
d,4,ux,0
d,5,ux,0
d,6,ux,0
```

将1~6号节点的X方向平动自由度约束。运行如下命令。

```
nsel,s,loc,x,6
nsel,r,loc,y,0
```

选出右端节点，用于加载支座的约束。

```
d,all,uy,0
```

D 命令将选出的右端节点的 Y 方向自由度约束，如图 10-11 所示。

运行如下命令。

```
nsel,all                    ! 选出所有节点
d,all,az                    ! 约束 Z 方向自由度
```

选出所有节点，约束 Z 方向自由度。

完成定义的约束如图 10-12 所示。

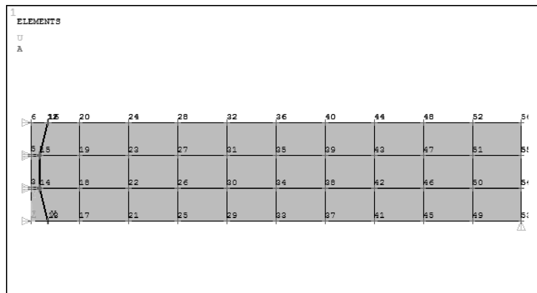


图 10-11　定义 XY 平面内的约束

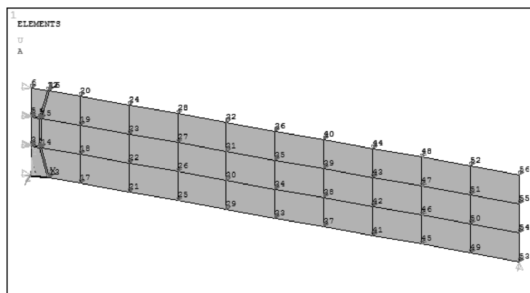


图 10-12　完成约束的模型

（6）本例将要考虑材料属性随温度变化，运行如下命令。

```
mptemp,1,100,1000,2400,2700,3000          ! 属性变化材料参数列表
mpdata,ex,1,1,30e6,30e6,10e6,5e6,.2e6
mpdata,ex,2,1,30e6,30e6,10e6,5e6,.2e6
mpdata,ex,3,1,30e6,30e6,10e6,5e6,.2e6
```

以上命令定义了材料弹性模量随温度改变，列表如图 10-13 所示。

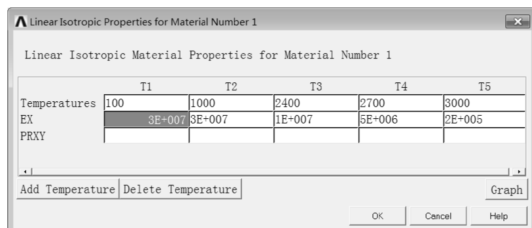


图 10-13　Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

继续运行如下命令，定义不同温度下材料的屈服强度。

```
tb,bkin,1,5             ! 定义材料屈服强度
tbtemp,100
tbdata,1,36000,1e6
tbtemp,1000
tbdata,1,36000,1e6
tbtemp,2400
tbdata,1,5000,1e6
tbtemp,2700
tbdata,1,1000,.5e6
tbtemp,3000
tbdata,1,500,.1e6
tbcopy,bkin,1,2
tbcopy,bkin,1,3
```

材料 1 在不同温度下的屈服温度如图 10-14 所示。

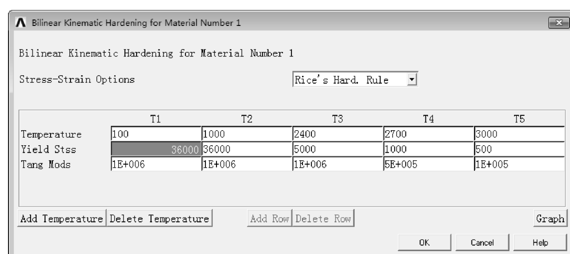


图 10-14　Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 1 对话框

至此，前处理完成，进入求解器，进行加载与求解。

（7）运行如下命令。

```
/solution              ! 进入求解器
antype,transient       ! 分析类型
timint,off             ! 瞬态效应
autots,on              ! 自动时间步
cnvtol,heat            ! 收敛选项
cnvtol,f               !
outpr,basic,last       ! 输出控制
outres,,last           ! 输出控制
kbc,1                  ! 阶跃荷载
nsubst,1               ! 定义荷载步的子步数
```

以上命令定义了分析类型为瞬态分析，关闭瞬态效应，打开自动时间步，设置收敛值为 heat，采用阶跃荷载加载，定义荷载步的子步数为 1。继续运行如下命令。

```
ealive,all
```

EALIVE 命令激活了所有单元。继续运行如下命令。

```
esel,s,,,1,5,2
nsle
d,all,temp,3000
```

选出图 10-15 所示的单元，在这些单元的节点上施加温度荷载，定义温度为 3000，如图 10-16 所示。

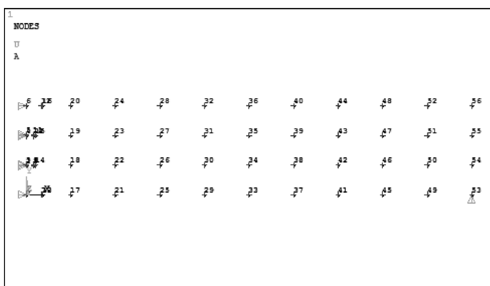


图 10-15　选出焊缝单元



图 10-16　施加温度荷载

继续运行如下命令。

```
nsel,inve
d,all,temp,100
```

反选出钢板的节点，施加温度荷载 100，如图 10-17 所示。

（8）运行如下命令进行温度求解（第 1 荷载步）。

```
nsel,all            ! 选择全部对象并开始求解
esel,all
time,1
solve
```

求解过程收敛曲线如图 10-18 所示。

（9）继续运行如下命令。

```
esel,s,,,1,5,2……          ! 选择焊缝
nsle
esln,a
```

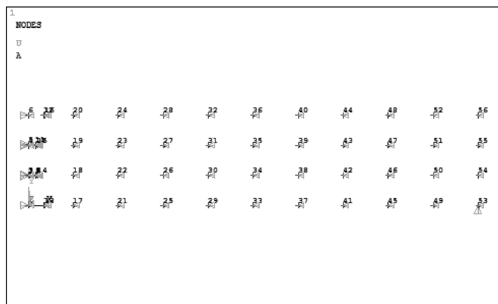


图 10-17　定义钢板温度

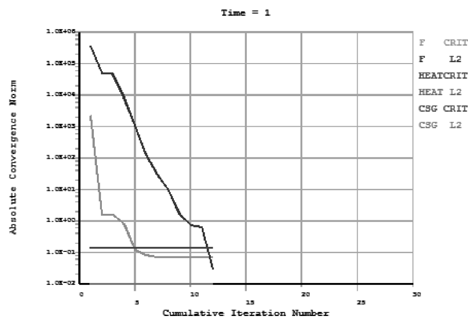


图 10-18　收敛曲线

选出焊缝的单元与节点，如图 10-19 所示。

运行如下命令。

```
cm,wnode,node          ! 杀死焊缝
cm,welem,elem
ekill,all
```

CM 命令用于定义组件名称。选出的节点被定义为一个组件，名为 wnode；将选出的单元定义为一个组，名为 welem。

EKILL 命令杀死了上述单元，此时焊缝单元“不存在”，如图 10-20 所示。接下来，即可运行如下求解命令，完成第 2 荷载步求解。

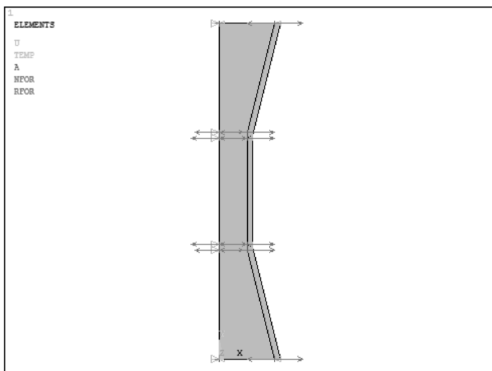


图 10-19　选出焊缝部分单元与节点

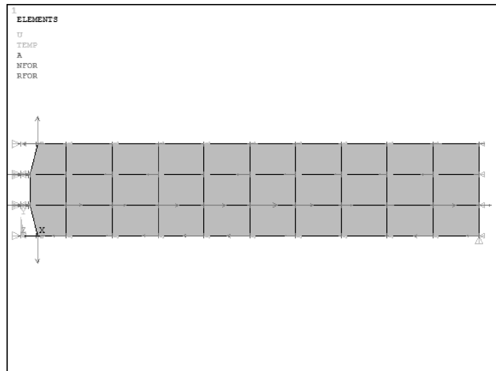


图 10-20　“活”单元

```
nsel,all                 ! 开始温度求解
esel,all
time,2
solve
```

（10）完成温度求解后，运行如下命令。

```
timint,on,ther              ! 定义荷载子步与瞬态效应
nsubst,20
```

开启瞬态效应，设置荷载子步为 20 步。继续运行如下命令。

```
esel,s,type,,2
nsle
ddele,all,temp
```

选出单元类型为 2 的单元，并选择属于这些单元的节点，删除这些节点的温度，如图 10-21 所示。

（11）运行如下命令。

```
nsel,all                 ! 删除温度荷载
esel,s,,,3
nsle
ddele,all,temp
```

选出 3 号单元，再选出属于它的节点，删除其温度，如图 10-22 所示。

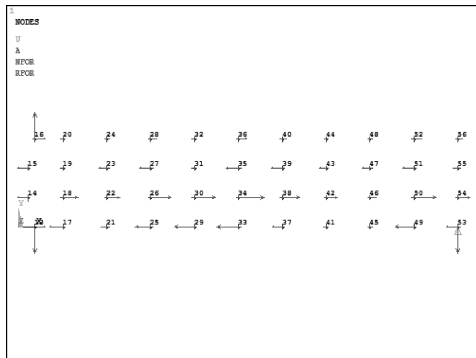


图 10-21　选出的节点

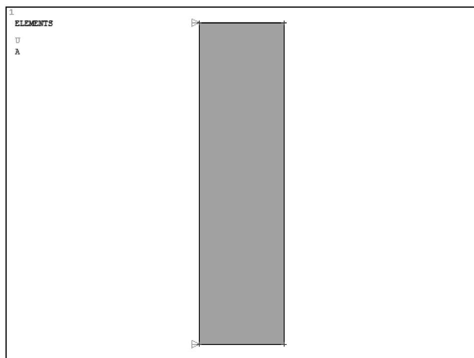


图 10-22　删除 3 号单元温度

（12）运行如下命令。

```
nsel,all                 ! 激活焊缝
esel,all
ealive,3
ealive,8
```

激活 3 号单元与 8 号单元。此时模型中活单元如图 10-23 所示。逐步激活单元，用以模拟焊接过程。

继续运行如下命令。

```
nsel,s,loc,y,0              ! 施加面荷载
nsel,a,loc,y,1.2
hfval=.00001
sf,all,conv,hfval,100
```

选中模型中 Y = 0 与 Y = 1.2 的节点，施加面荷载，对流系数为 hfval，体平均温度为 100，如图 10-24 所示。

（13）运行如下命令。

```
nsel,all          ! 设置输出参数并开始求解
time,30
outpr,all,all
outres,all,allsolve
```

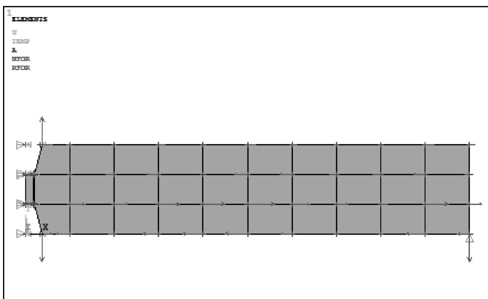


图 10-23 “活单元”

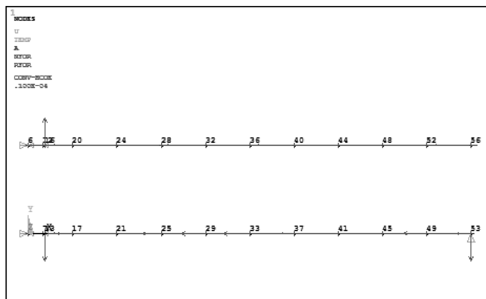


图 10-24 定义对流系数与体温度

定义第 3 荷载步，时间为 30，设置输出参数为全部输出，求解。

（14）求解完第 3 荷载步后运行如下命令。

```
esel,s,,,1,3,2          ! 删除上一步的荷载
nsle
ddele,all,temp
```

将 1、3、2 号单元上的节点选出，删去其上温度，如图 10-25 所示。

运行如下命令。

```
nsel,all          ! 激活下一部分焊缝
esel,s,,,5
nsle
esln,a
esel,inve
ealive,all
```

此时活单元如图 10-26 所示。

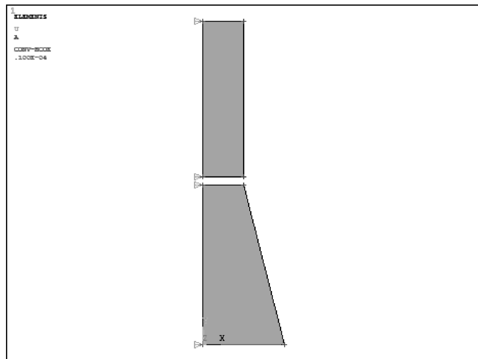


图 10-25 激活焊缝单元

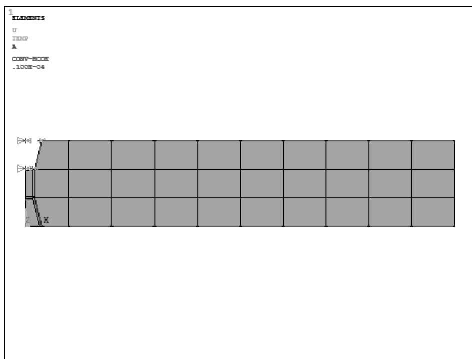


图 10-26 “活”单元

（15）运行如下命令，求解第 4 荷载步。

```
nsel,all              ! 设置载输出参数并开始求解
esel,all
time,300
autot,on
deltim,10,5,30
outpr,all,all
outres,all,all
solve
```

设置荷载步的时间为300，打开自动时间步长，求解。

（16）完成第4荷载步后，运行如下命令。

```
ddele,all,temp          ! 删除上一步的载荷
ealive,all              ! 激活剩余的焊缝
time,600                ! 设置输入参数并开始求解
autot,on
deltim,10,5,30
outpr,all,all
outpr,all,all
solve
fini
```

此时，活单元如图10-27所示，焊缝已经生成。

（17）完成求解后，在GUI界面中可以查看图形结果。在GUI界面中选择Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape命令，弹出图10-28所示的Plot Deformed Shape对话框。

在该对话框中选中Def + undef edge单选按钮，单击OK按钮，即可在工作区中显示图10-29所示的变形图。也可以在工作区中显示应力分布，如图10-30和图10-31所示。

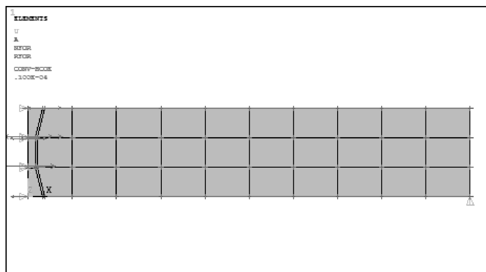


图10-27　激活全部单元

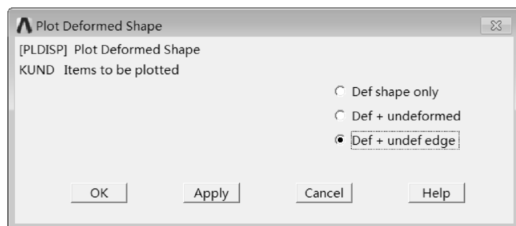


图10-28　Plot Deformed Shape对话框

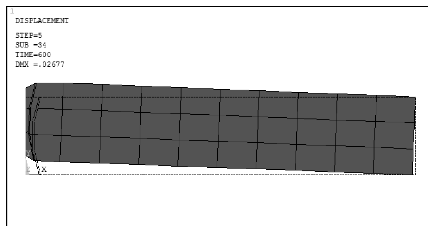


图10-29　变形图

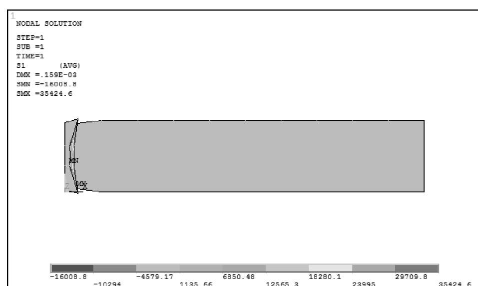


图10-30　初始应力

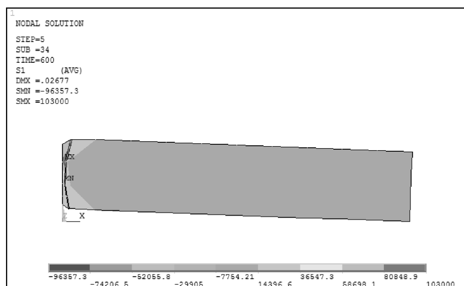


图10-31　最终应力分布

10.3 铸造过程仿真

ANSYS 热分析最强大的功能之一就是可以分析相变问题，如凝固或熔化等。含有相变问题的热分析是一个非线性的、瞬态的问题。

10.3.1 概述

（1）相变问题需要考虑熔融潜热，即在相变过程吸收或释放的热量。ANSYS 通过定义材料的焓随温度变化来考虑熔融潜热（如图 10-32 所示）。

焓的单位是 J/m^3，是密度与比热的乘积对温度的积分：

$$H = \int \rho C(T)\mathrm{d}T$$

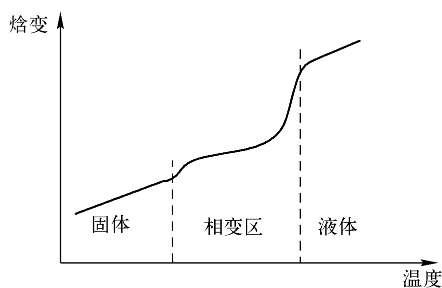


图 10-32 焓－温度曲线

（2）求解相变问题，应当设定足够小的时间步长，并将自动时间步长设置为 ON。

（3）选用低阶的热单元，如 PLANE55 或 SOLID70。如果必须选用高阶单元，则将单元选项 KEYOPT(1)设置为 1。

- APDL 命令：KEYOPT(1)＝1。
- GUI 界面操作：MainMenu > Preprocessor > ElementType > Add/Edit/Delete > Options > Specific Heat Matrix > Diagonalized。

（4）在设定瞬态积分参数时，应将 THETA 值设置为 1（默认为 0.5）。

- APDL 命令：TINTP。
- GUI 界面操作：Main Menu > Solution > Load and Step Opts > Time/Frequence > Time intergration > THETA。

（5）线性搜索将有助于相变问题的加速求解。

- APDL 命令：LNSRCH。
- GUI 界面操作：Main Menu > Solution > Load and Step Opts > Nonlinear > Line Search。

10.3.2 分析过程

钢铸件及其砂模的横截面尺寸如图 10-33 所示。

砂模是由型砂构成，型砂的热物理性能见表 10-3。

表 10-3 型砂的热物理性能

	单 位 制	
导热系数（KXX）	Btu/hr. in^2. ℉	0.025
密度（DENS）	lbm/in^3	0.254
比热（C）	Btu/lbm. ℉	0.28

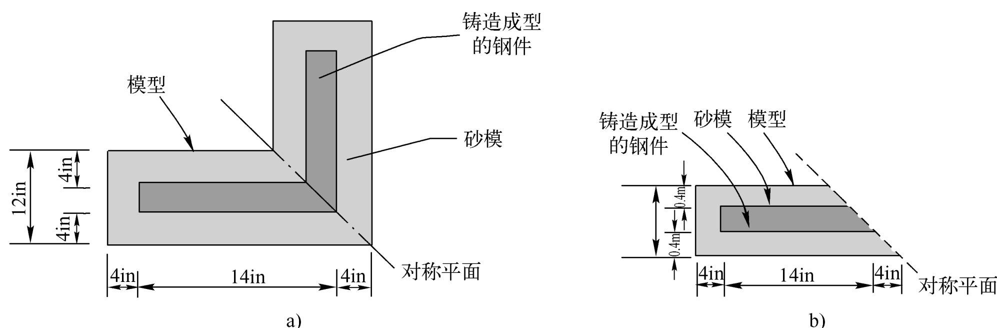


图 10-33 几何尺寸

a）问题描述 b）根据对称性确定计算模型

铸钢的热物理性能如表 10-4 所示。

表 10-4 铸钢热物理性能

	单位制	0℉	2643℉	2750℉	2875℉
导热系数	Btu/hr. in^2. ℉	1. 44	1. 54	1. 22	1. 22
焓	Btu/in^3	0	128. 1	163. 8	174. 2

铸钢的初始温度为 2875℉，砂模的初始温度为 80℉。砂模外边界的对流边界条件：对流系数为 0. 014Btu/hr. in^2. ℉，空气温度为 80℉。求 3 h 后铸钢及砂模的温度分布。

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17. 0，弹出 17. 0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。

（2）在该窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 框中输入工作目录名称，在 Job Name 框中输入项目名称 10 – 2。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。

（3）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，弹出图 10-34 所示的 Element Types 对话框。

（4）单击 Add 按钮，弹出图 10-35 所示的 Library of Element Types 对话框。选择单元类型为 PLANE77，单击 OK 按钮。

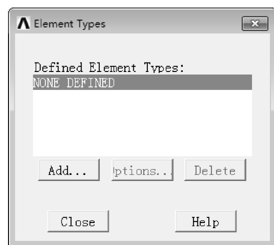


图 10-34 Element Types 对话框

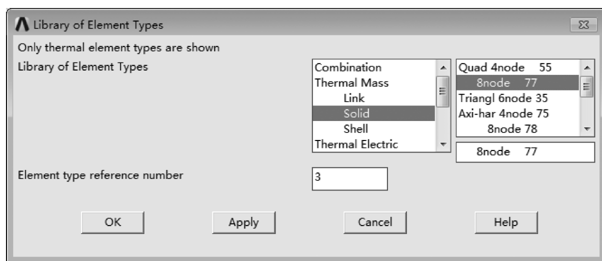


图 10-35 Library of Element Types 对话框

此时回到 Element Types 对话框中即可看到添加的单元类型。

（5）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出图 10-36 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。

（6）选择材料模型 Thermal > Conductivity > Isotropic，在弹出的图 10-37 所示 Conductivity for Material Number 1 对话框中设置 KXX = 0.025，单击 OK 按钮。

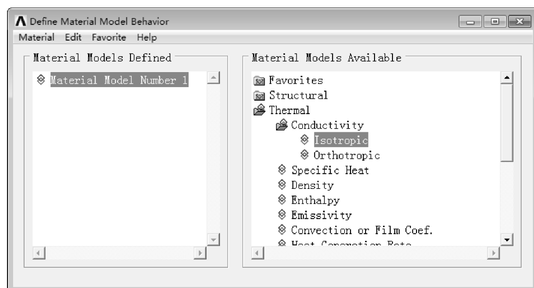


图 10-36　Define Material Model Behavior 对话框

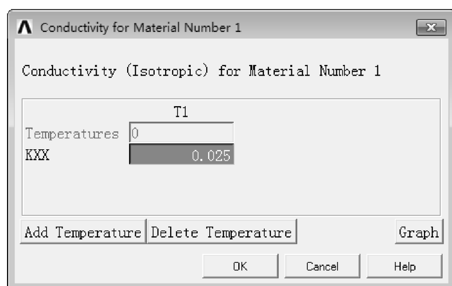


图 10-37　Conductivity for Material Number 1 对话框

（7）回到图 10-36 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择 Thermal > Density，在弹出的图 10-38 所示 Density for Material Number 1 对话框中设置 DENS = 0.054，单击 OK 按钮。

（8）回到图 10-36 所示 Define Material Model Behavior 对话框，选择 Thermal > Specific Heat，在弹出的图 10-39 所示 Specific Heat for Material Number 1 对话框中设置 C = 0.28，单击 OK 按钮。

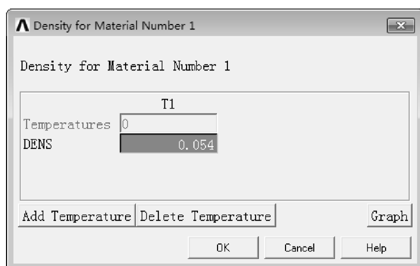


图 10-38　Density for Material Number 1 对话框

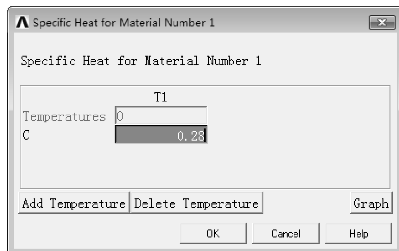


图 10-39　Specific Heat for Material Number 1 对话框

（9）回到图 10-36 所示 Define Material Model Behavior 对话框，选择 Material > New Model，弹出图 10-40 所示的 Define Material ID 对话框，在 Define Material ID 框中输入材料编号 2。

（10）在图 10-36 所示的 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Thermal > Conductivity > Isotropic，弹出 Conductivity for Material Number 2 对话框。

（11）单击 Add Temperature 按钮，添加 2 个温度输入框，在其中输入温度值与对应导热系数值，如图 10-41 所示。

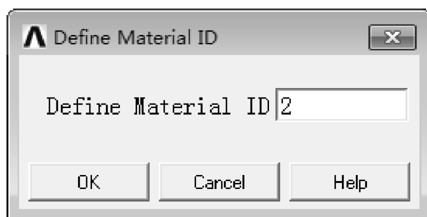


图 10-40　Define Material ID 对话框

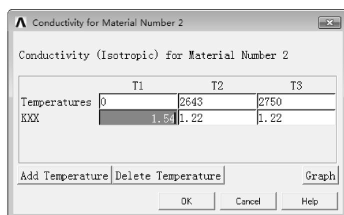


图 10-41　Conductivity for Material Number 2 对话框

（12）在图 10-36 所示 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Thermal > Enthalpy，弹出 Enthalpy for Material Number 2 对话框。

（13）单击 Add Temperature 按钮，添加 2 个温度输入框，在其中输入温度值与对应焓值，如图 10-42 所示。

完成材料定义，1 号材料为型砂，2 号材料为铸钢。

（14）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot > Materials 命令，弹出图 10-43 所示的 Graph Material Properties 对话框。

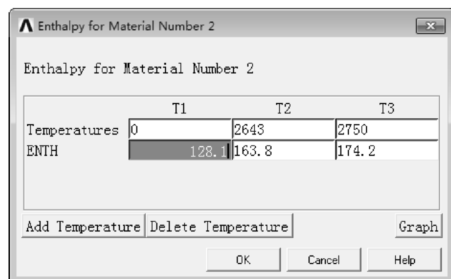


图 10-42 Enthalpy for Material Number 2 对话框

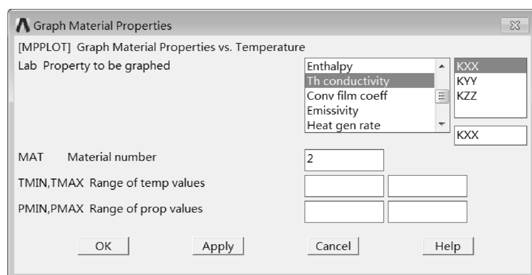


图 10-43 Graph Material Properties 对话框

（15）选择 The conductivity > KXX，输入材料编号 2，单击 OK 按钮，在工作区中显示导热系数 – 温度曲线，如图 10-44 如示。

（16）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot > Materials 命令，弹出图 10-45 所示的 Graph Material Properties 对话框。

（17）选择 Enthalpy，输入材料编号 2，单击 OK 按钮，在工作区中显示焓 – 温度曲线，如图 10-46 如示。

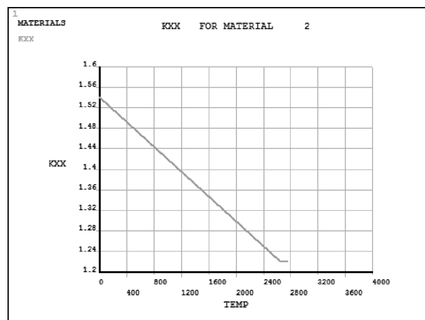


图 10-44 导热系数 – 温度曲线

（18）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。

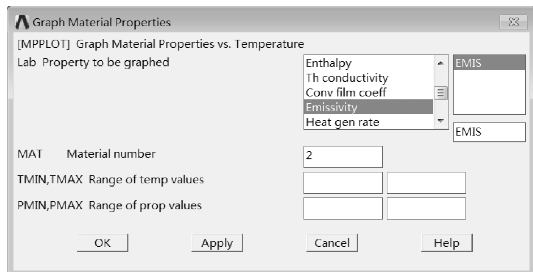


图 10-45 Graph Material Properties 对话框

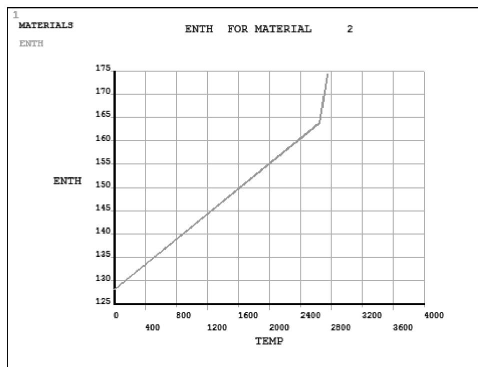


图 10-46 焓 – 温度曲线

（19）在 NPT Keypoint number 框中输入关键点编号 1，在 X,Y,Z Location in active CS 框中输入 1 号关键点的坐标值，如图 10-47 所示。单击 Apply 按钮确认并继续输入下一个关键点坐标，直至完成表 10-5 所示所有关键点的定义。

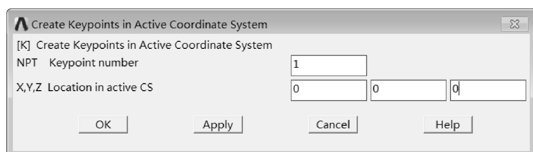


图 10-47 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

表 10-5 关键点坐标

关键点号	X	Y	X
1	0	0	0
2	22	0	0
3	10	12	0
4	0	12	0

完成定义的关键点如图 10-48 所示。

（20）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs 命令，弹出图 10-49 所示的 Create Area thru KPs 对话框，输入关键点编号 1,2,3,4（用英文逗号隔开），单击 OK 按钮，生成面如图 10-50 所示。

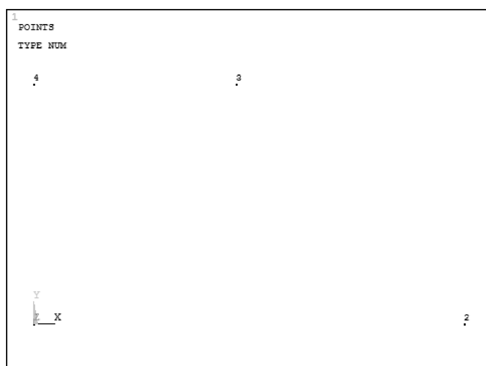


图 10-48 完成定义的关键点

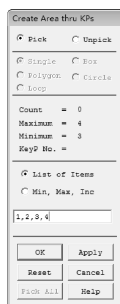


图 10-49 Create Area thru KPs 对话框

（21）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Dimensions 命令，弹出 Create Rectangle by Dimensions 对话框，输入矩形的两个角点坐标，如图 10-51 所示。

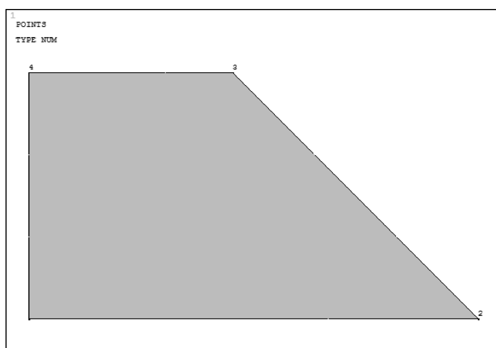


图 10-50 通过连接关键点生成面

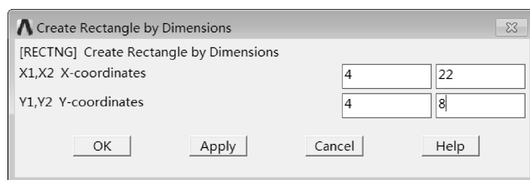


图 10-51 Create Rectangle by Dimensions 对话框

（22）单击 OK 按钮，在工作区中生成矩形，如图 10-52 所示。

（23）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Overlap > Areas 命令，弹出 Overlap Areas 对话框，单击 Pick All 按钮，两个面搭接如图 10-53所示。

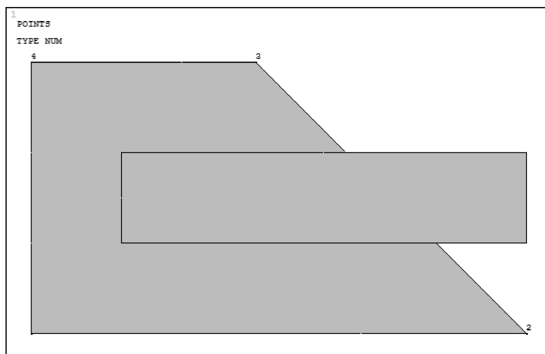


图 10-52　生成矩形

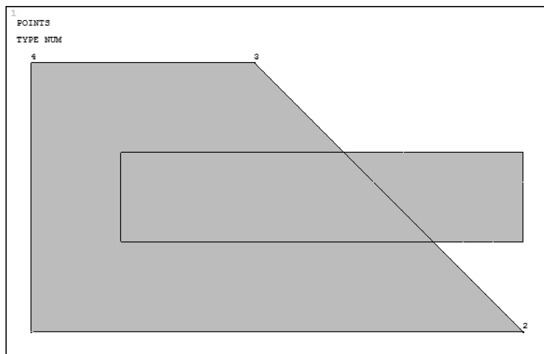


图 10-53　搭接

（24）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Numbering 命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，设置如图 10-54 所示，单击 OK 按钮。

此时工作区中的显示效果应如图 10-55 所示。

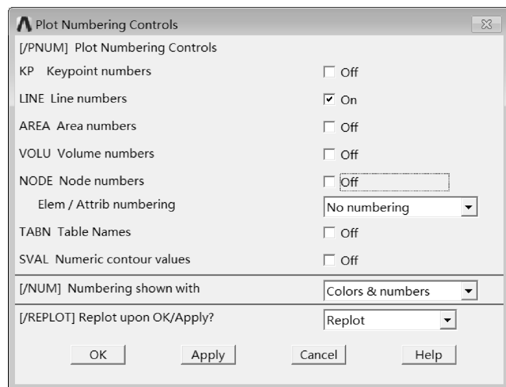


图 10-54　Plot Numbering Controls 对话框

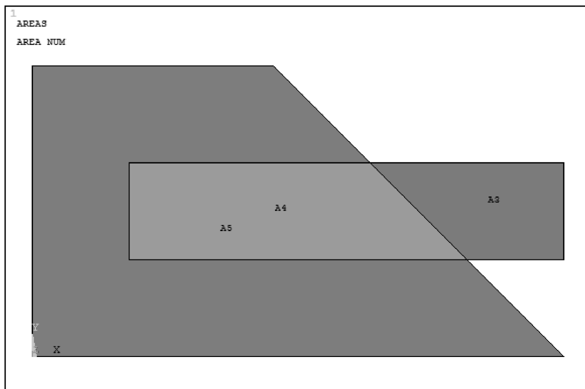


图 10-55　显示面编号

（25）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Area and Below 命令，弹出 Delete Area and Below 对话框，在工作区中拾取 3 号面，单击 OK 按钮。

（26）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Global > Size 命令，弹出图 10-57 所示的 Global Element Sizes 对话框，设置单元尺寸为 1，单击 OK 按钮。

（27）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 sided 命令，弹出 Mesh Areas 对话框。

（28）在工作区中拾取 5 号面，单击 OK 按钮，完成 5 号面的网格划分，如图 10-58 所示。

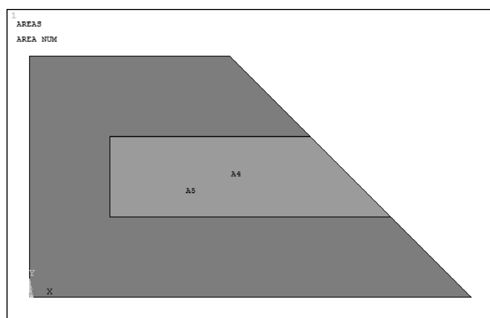


图 10-56　删除 3 号面

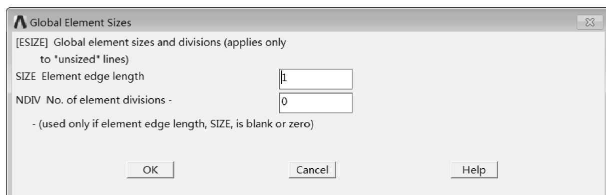


图 10-57　Global Element Sizes 对话框

（29）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs 命令，弹出图 10-59 所示的 Meshing Attributes 对话框。

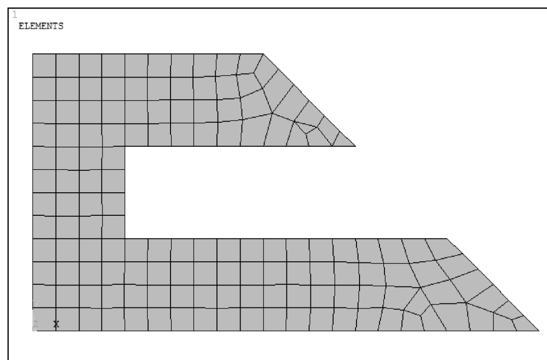


图 10-58　划分 5 号面的网格

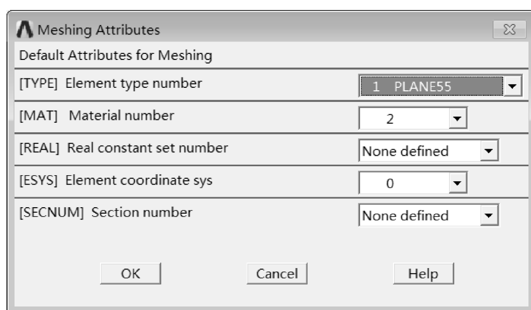


图 10-59　Meshing Attributes 对话框

（30）将 MAT Material number（材料编号）设置为 2，单击 OK 按钮。

（31）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 sided 命令，弹出 Mesh Areas 对话框。选择 4 号面，单击 OK 按钮，完成面的网格划分，如图 10-60 所示。

（32）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 10-61所示的 New Analysis 对话框，设置分析类型为 Transient，即瞬态分析。

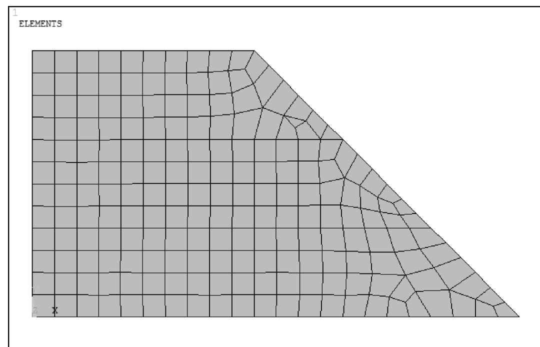


图 10-60　完成面的网格划分

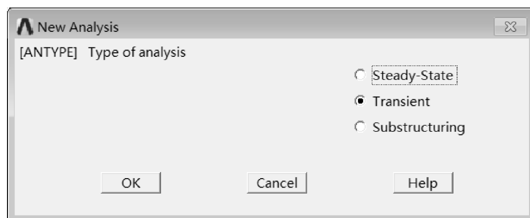


图 10-61　New Analysis 对话框

（33）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框，设置参数如图 10-62 所示。单击 Apply 按钮，选出材料号为 2 的单元，如图 10-63 所示。

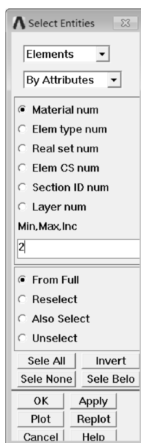


图 10-62 Select Entities 对话框

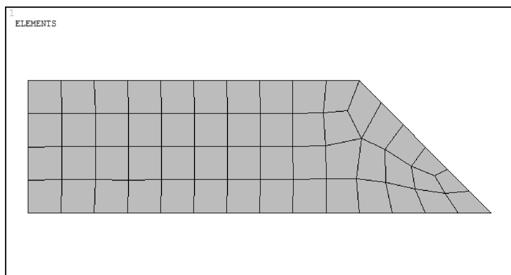


图 10-63 选中铸钢单元

（34）将 Select Entities 对话框中的参数设置为图 10-64 所示，单击 OK 按钮，选中的节点如图 10-65 所示。

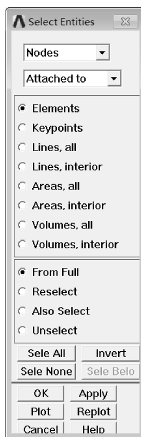


图 10-64 Select Entities 对话框

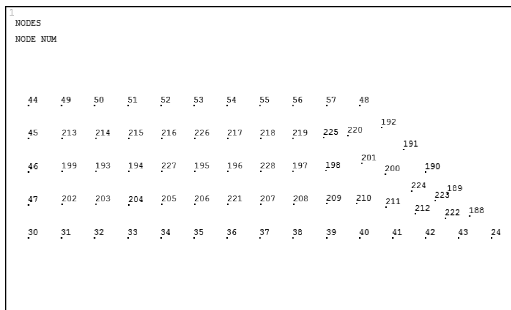


图 10-65 选中铸钢单元的节点

（35）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Initial Condit'n > Define 命令，弹出 Define Initial Conditions 对话框。

（36）单击 Pick All 按钮，弹出图 10-66 所示的 Define Initial Conditions 对话框，设置初始条件为 TEMP，值为 2875。

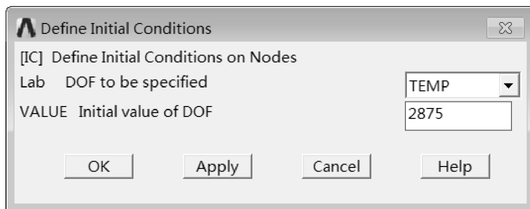


图 10-66 Define Initial Conditions 对话框

（37）在 GUI 界面中选择 Utility Menu >

Select > Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框，设置参数如图 10-67 所示。单击Invert按钮，反选出其余单元，如图 10-68 所示。

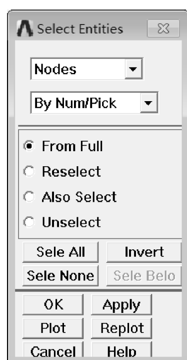


图 10-67 Select Entities 对话框

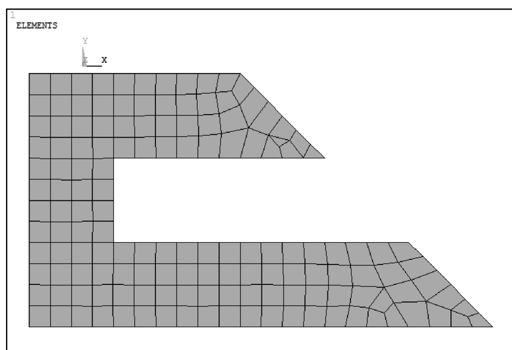


图 10-68 选中砂模单元

（38）将 Select Entities 对话框中的参数设置为如图 10-69 所示，单击 OK 按钮，选中的节点如图 10-70 所示。

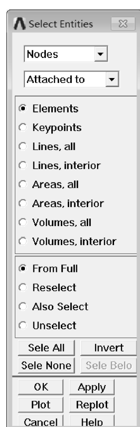


图 10-69 Select Entities 对话框

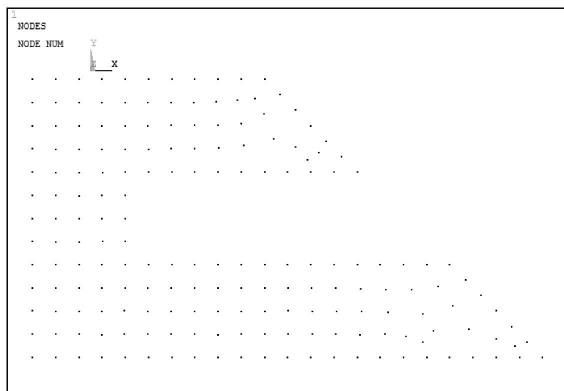


图 10-70 选中砂模单元的节点

（39）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Initial Condit'n > Define 命令，弹出 Define Initial Conditions 对话框。

（40）单击 Pick All 按钮，弹出图 10-71 所示的 Define Initial Conditions 对话框，设置初始条件为 ALL DOF，值为 80。

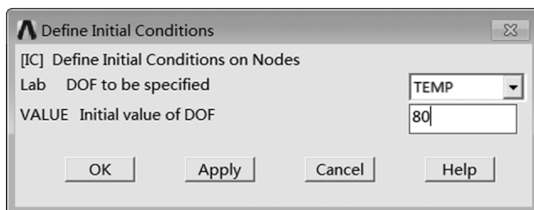


图 10-71 Define Initial Conditions 对话框

（41）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot > Lines 命令，在工作区中绘出线框模型。

（42）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Convection > On Lines，在工作区中拾取模型外缘 3 条线（见图 10-72），单击 OK 按钮，弹出图 10-73所示的 Apply CONV on lines 对话框。

（43）设置热传导系数为 0.014，总体温度为 80，单击 OK 按钮，完成边界条件设置，

如图 10-74 所示。

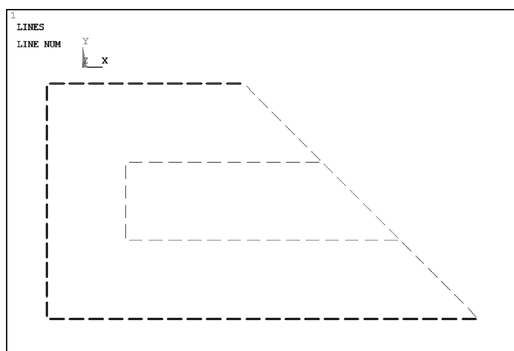


图 10-72 选中砂模的外缘

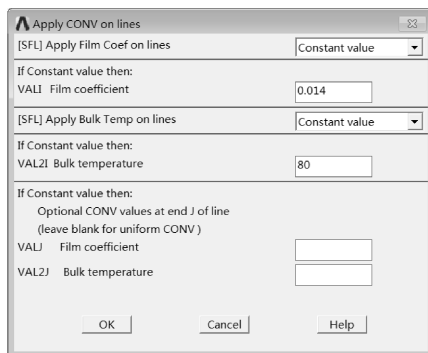


图 10-73 Apply CONV on lines 对话框

（44）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls 命令，弹出图 10-75 所示的 Solution Controls 对话，设置 Basic 选项卡如图 10-75 所示。

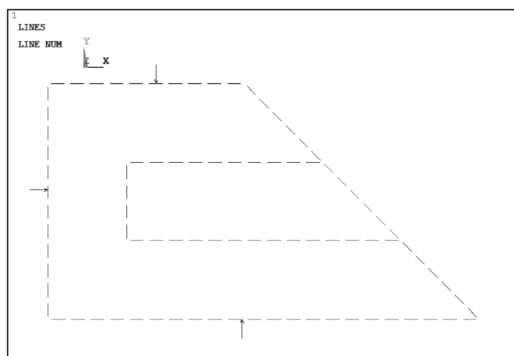


图 10-74 完成边界条件设置

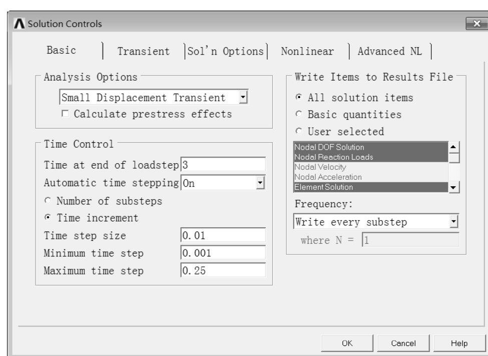


图 10-75 Solution Controls 对话框（Basic 选项卡）

（45）选择 Transient 选项卡，将加载方式设置为 Stepped loading（见图 10-76），单击 OK 按钮。

（46）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > DB/Results File 命令，弹出 Controls for Database and Results Files Writing 对话框。

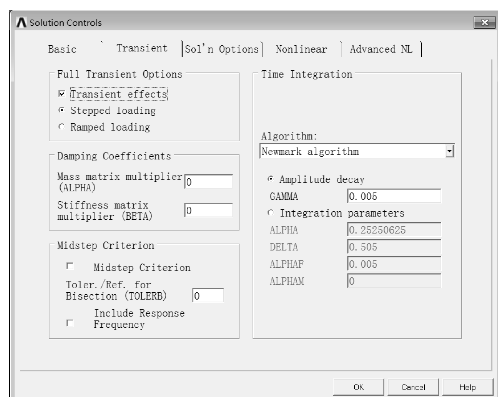


图 10-76 Solution Controls 对话框（Transient 选项卡）

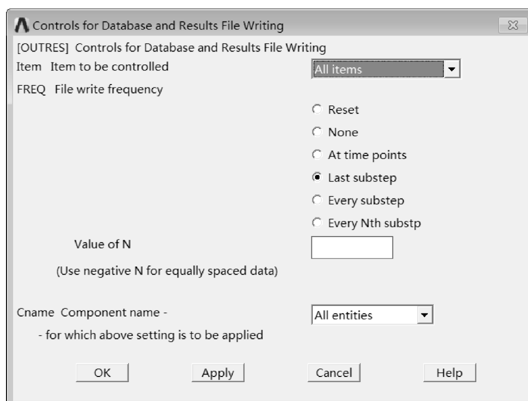


图 10-77 Controls for Database and Results File Writing 对话框

（47）如图 10-77 所示，设置 Item Item to be controlled（输出参数的控制对象）为 All items，输出为 All entities（全部输出），单击 OK 按钮。

（48）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，弹出图 10-78 所示的/STATUS Command 窗口，其中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 10-79 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

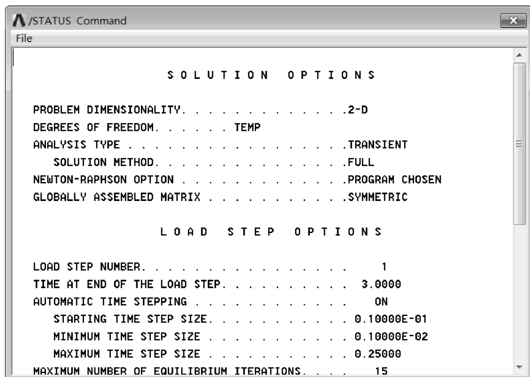


图 10-78　/STATUS Command 窗口

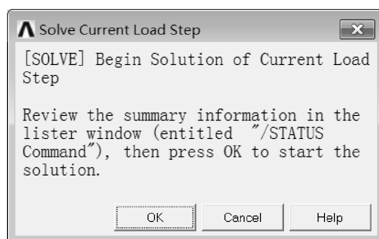


图 10-79　Solve Current Load Step 对话框

（49）单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明求解完成。

求解过程中，工作区随时间进程绘出图 10-80 所示的绝对收敛范数—累积迭代次数曲线，反映了 ANSYS 求解状态。

（50）完成求解后即可进行后处理。进入时间历程后处理器（/POST26），弹出图 10-81 所示的 Time History Variables 对话框。

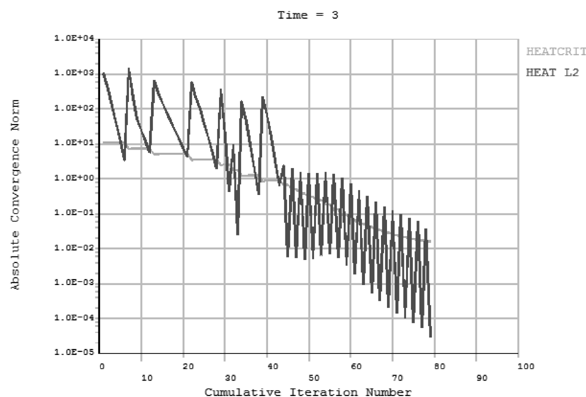


图 10-80　绝对收敛范数—累积迭代次数的线

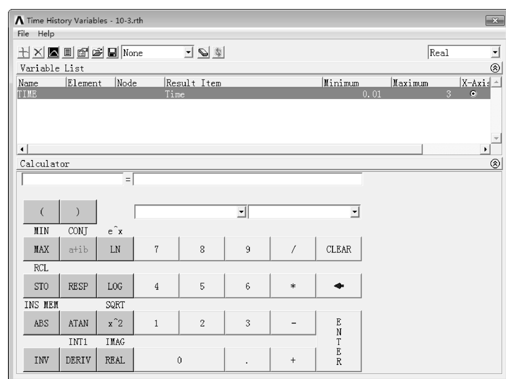


图 10-81　Time History Variables 对话框

（51）单击添加变量按钮，弹出图 10-82 所示的 Add Time－History Variable 对话框。

单击 OK 按钮，在弹出的图 10-83 所示 Node for Data 对话框中输入节点号 204（这是位于铸钢中心的一个节点）。单击 OK 按钮，完成变量的添加。单击 Time History Variables 对话框中的绘制曲线按钮，在工作区中绘出的曲线如图 10-84 所示。

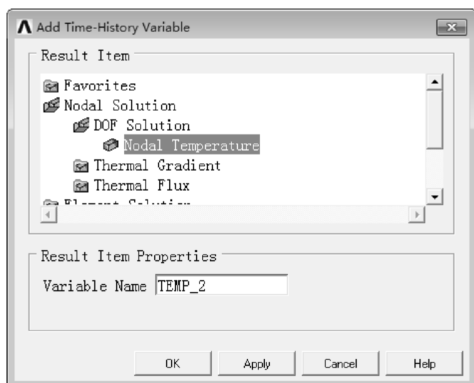


图 10-82 Add Time－History Variable 对话框

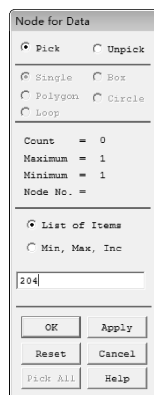


图10-83 Node for Data 对话框

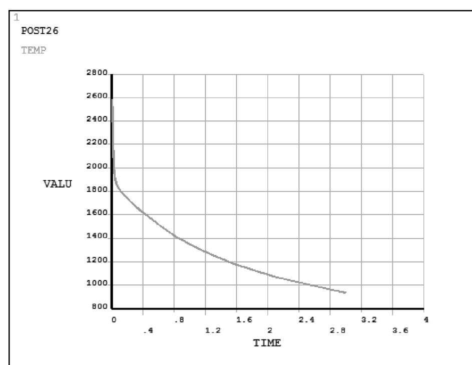


图 10-84 节点 204 的温度－时间曲线

（52）单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出 Exit 对话框。

（53）选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS。

10.4 本章小结

热力学分析是 ANSYS 的一个重要应用领域，不仅在机械工程分析中有着大量的应用，在土木工程领域也有广泛的用途。

机械工程领域的实例为引导，详细介绍了典型的热分析应用场合，并对如何进行热分析等做了深入的探讨。参考本章的介绍，读者可以举一反三，自己动手编写工程实际问题的分析程序，对加工过程进行仿真分析。



第 11 章　装配与复合材料分析

装配是进行机械加工的重要过程，良好的装配精度才能保证各工件的精确配合，否则无论多高的材料强度、多高的加工精度都是枉然。

复合材料是现代材料技术的结晶，不同材料以合理方式复合，取长补短，使材料的性能得到更充分的发挥。

装配问题与复合材料特殊的材料特性，在分析时表现出显著非线性。对此 ANSYS 提供了强大的非线性分析功能，能够对这一类问题进行准确、高效的仿真与分析。

本章学习目标

- 了解非线性分析的概念
- 了解非线性分析的基础知识
- 掌握解决几何非线性问题的方法
- 掌握大应变问题分析方法
- 掌握材料非线性分析的方法

11.1　非线性问题概述

在日常生活中，经常会遇到结构非线性问题。例如，使用订书机订书时，金属钉书钉将永久地弯曲成不同的形状；在一个木架上放置重物，随着时间的推移木架会越来越下垂；在汽车或卡车上装载货物时，其轮胎和下方路面的接触面将随货物重量而变化。如果将上述例子的荷载变形曲线画出来（见图 11-1），将发现它们都显示了非线性结构的基本特征——结构刚度改变。

11.1.1 非线性分析基础知识

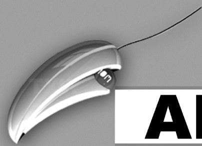
1. 关于弹性材料与塑性材料

理想弹性材料物体发生弹性变形时，应力与应变完全呈线性关系，并可假定它从弹性变形过渡到塑性变形是突然的。

理想塑性材料（又称全塑性材料）是指材料发生塑性变形时不产生硬化的材料。这种材料在进入塑性状态后，应力不再增加，也就是在中性荷载时即可连续产生塑性变形。

弹塑性材料在研究材料塑性变形时，需要考虑塑性变形之前的弹性变形。具体分为两种情况：

- 理想弹塑性材料在塑性变形时，需要考虑塑性变形之前的弹性变形，而不考虑硬化的



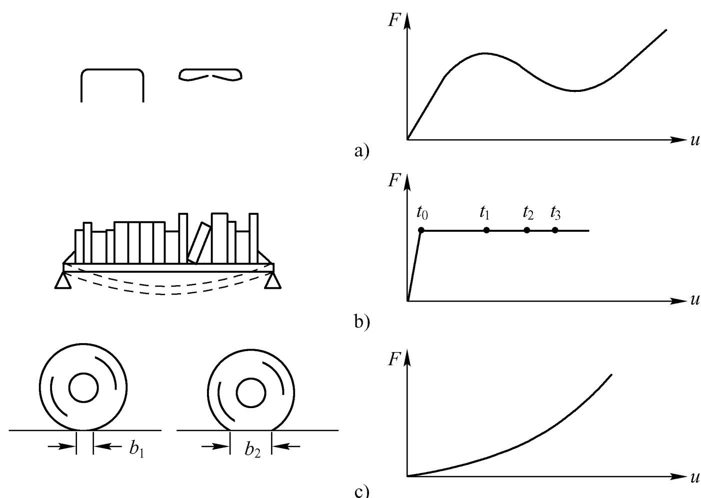


图 11-1　非线性问题示意图

a）钉书钉　b）木架　c）轮胎

材料，也就是材料进入塑性状态后，应力不再增加，可连续产生塑性变形。

- 弹塑性硬化材料在塑性变形时，既要考虑塑性变形之前的弹性变形，也要考虑加工硬化材料。这种材料在进入塑性状态后，如应力保持不变，则不能进一步变形。只有在应力不断增加，也就是在加载条件下才能连续产生塑性变形。

刚塑性材料在研究塑性变形时不考虑塑性变形之前的弹性变形。具体分为两种情况：

- 理想刚塑性材料在研究塑性变形时，既不考虑弹性变形，也不考虑变形过程中的加工硬化材料。
- 刚塑性硬化材料在研究塑性变形时，不考虑塑性变形之前的弹性变形，但需要考虑变形过程中的加工硬化材料。

2. 关于屈服准则

受力物体内质点处于单向应力状态时，只要单向应力大到材料的屈服点，则该质点开始由弹性状态进入塑性状态，即处于屈服。

受力物体内质点处于多向应力状态时，必须同时考虑所有的应力分量。在一定的变形条件（变形温度、变形速度等）下，只有当各应力分量之间符合一定关系时，质点才开始进入塑性状态。这种关系称为屈服准则，也称塑性条件，即受力物体中处于不同应力状态下的质点进入塑性状态并使塑性变形继续进行所必须遵守的力学条件。这种力学条件一般可表示为 $f(\sigma_{ij})=C$，又称为屈服函数。式中 C 是与材料性质有关而与应力状态无关的常数，可通过试验求得。屈服准则是求解塑性成型问题必要的补充方程。

11.1.2 非线性问题的分类

引起结构非线性的原因大致分为 3 种：几何非线性、材料非线性、状态变化。

1. 几何非线性

如果结构经受大变形，其几何形状的变化可能会引起结构的非线性响应。如图 11-2 所示，随着垂向荷载的增加，鱼杆不断弯曲以至于力臂明显地减少，导致杆端显示出在较高荷

载下不断增长的刚性。几何非线性的特点是大位移、大转动。

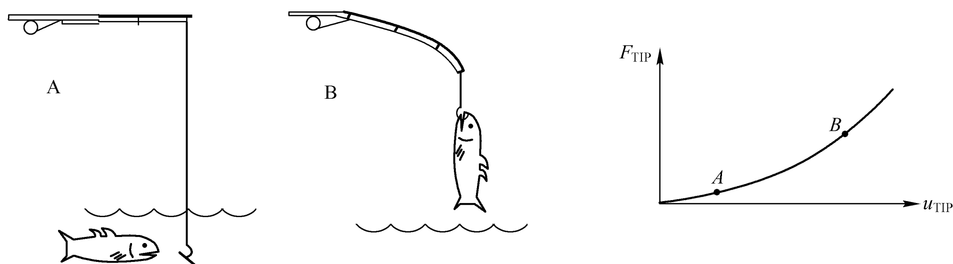


图 11-2 大变形导致结构非线性

2. 材料非线性

非线性的应力应变关系是结构非线性行为的常见原因。许多因素可以影响材料的应力应变性质，包括加载历史（如在弹－塑性响应情况下）、环境状况（如温度）、加载的时间总量（如在蠕变响应情况下）。

3. 状态变化

许多普通结构表现出一种与状态相关的非线性行为。例如，一根只能拉伸的电缆可能是松的，也可能是绷紧的；轴承套可能是接触的，也可能是不接触的；冻土可能是冻结的，也可能是融化的。这些系统的刚度由于系统状态的改变而变化。状态的改变也许和荷载直接有关（如在电缆情况中），也可能是由某种外部原因引起的（如在冻土中的紊乱热力学条件）。接触是一种很普遍的非线性行为。接触是状态变化非线性中一个特殊而重要的子集。

11.1.3 非线性分析的收敛问题

1. 着手非线性分析

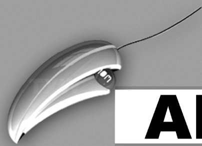
花一些时间来认真研究并进行分析，可以避免很多与非线性分析有关的困难。下面的建议对读者应当有所帮助。

如果用户在以前未应用过某一种非线性特性，则应当在分析大型、复杂的模型之前，首先建立一个简单的模型（即只包含几个单元的模型），并确保对其特性有所了解。

保持最终模型尽可能简单。如果可用二维平面应力、平面应变或轴对称模型来代表三维结构，那就这么做。如果可通过对称或反对称面来使模型规模减小，那就这么做。然而，如果荷载是反对称的，则通常不采用反对称的特点。反对称也可能在大变形分析时不适用。如果忽略某一非线性细节而不会影响模型关键区域的结果，那么就应该这么做。在可能时，用静力等效荷载来模拟瞬态动力荷载。

应当认识到，在经受塑性变形的区域，要求相当的积分点密度。低阶单元提供了与高阶单元相同的积分点数目，因此在塑性分析中应用低阶单元较为合算。在塑性铰区域，网格密度尤其重要。在接触表面要有足够的网格密度，以使接触应力分布较光滑。

为了求解应力，也要有足够的网格密度。需要计算应力或应变的区域要比位移或非线性解析区域网格要密一些。需要高阶模态时，网格密度要足够。需要的单元数目，取决于单元假定的位移形状函数，以及模态形状本身。对于瞬态动力波传播，要采用足够密的网格。如果波传播很重要，则一个波长最小要 20 单元。



对于非保守、路径相关系统，施加荷载时要用足够小的荷载增量，以保证分析接近荷载-响应曲线。有时，可以逐渐地加载，而使保守系统的收敛行为有所改进，这样可使 Newton-Raphson 平衡迭代数最小。

2. 克服收敛问题

收敛失败可能表示结构产生物理上的不稳定性，也可能仅仅是由有限元模型中的某些数值问题引起的。在执行非线性分析过程中，ANSYS 在每个迭代期间根据收敛准则计算收敛模。批命令方式和交互方式均可应用的图形求解追踪（GST）特性，在计算过程中将显示计算的收敛模以及准则。典型的 GST 显示如图 11-3 所示。

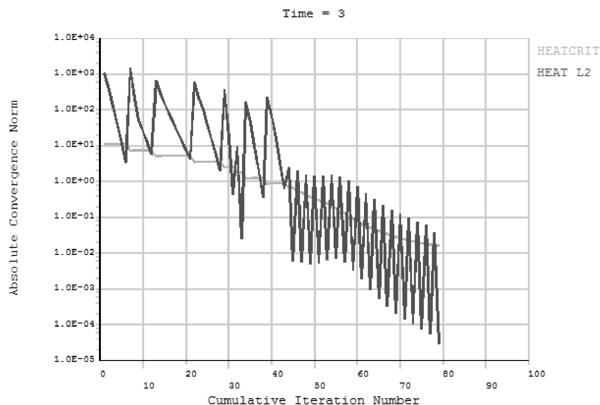


图 11-3 有 GST 特性显示的收敛范数

11.2 接触问题实例分析

本小节将带领大家进行接触问题的实例分析。

11.2.1 接触分析基础知识

1. 概述

接触问题是一种高度非线性行为，需要较多的计算机资源。为了进行准确高效的计算，理解问题的物理特性和建立合理的模型是很重要的。

接触问题存在两个较大的难点。

首先，在求解问题之前，用户通常不知道接触区域。随荷载、材料、边界条件和其他因素的不同，表面之间可以接触或者分开，这往往在很大程度上是难以预料的，并且还可能是突然变化的。

其次，大多数的接触问题需要考虑摩擦作用。有几种摩擦定律和模型可供挑选，它们都是非线性的。摩擦效应可能是无序的，从而使问题的收敛性成为一个难点。

注意： 如果在模型中不考虑摩擦，且物体之间总是保持接触，则可以使用约束方程或自由度耦合来代替接触。

2. 一般接触分类

接触问题分为两种基本类型：刚体-柔体的接触、柔体-柔体的接触。

- 在刚体 – 柔体的接触问题中，接触面的一个或多个被当作刚体（与和它接触的变形体相比，有大得多的刚度）。一般情况下，一种软材料和一种硬材料接触时，可以假定为刚体 – 柔体的接触。许多金属成型问题归为此类接触。
- 柔体 – 柔体的接触是一种更普遍的类型，在这种情况下，两个接触体都是变形体（有相似的刚度）。栓接法兰就是一种柔体 – 柔体接触。

3. ANSYS 接触分析功能

ANSYS 支持多种接触方式。根据接触面的类型，可以分为面 – 面接触、点 – 面接触、点 – 点接触 3 种。每种接触方式使用不同的接触单元集，并适用于某一特定类型的问题。

（1）面 – 面接触。

在涉及两个边界的接触问题中，很自然把一个边界作为“目标”面，而把另一个作为“接触”面。对刚体 – 柔体的接触，目标面总是刚性面；接触面总是柔性面；对柔体 – 柔体的接触，目标面和接触面都与变形体关联。这两个面合起来叫做“接触对”。

（2）点 – 面接触。

在 ANSYS 中可以使用点 – 面接触单元来模拟一个表面和一个节点的接触。另外，可以通过把表面指定为一组节点，用点 – 面接触来代表面 – 面接触。

ANSYS 程序的点 – 面接触单元允许下列非线性行为：

- 有大变形的面 – 面接触分析。
- 接触和分离。
- 库仑摩擦滑动。
- 热传递。

点 – 面接触是工程应用中普遍发生的现象，例如夹具（螺母、螺栓、铆钉、销钉等）、金属成型、轧制、动力管道装配等，工程技术人员关心的是由于结构之间的接触而产生的应力、变形、力和温度等的改变。

（3）点 – 点接触。

在 ANSYS 中还可以使用点 – 点接触单元来模拟点 – 点接触（柔体 – 柔体或刚体 – 柔体接触）。此外，可以使用这些单元来表示两个面之间的接触，在各个面上相对的节点之间指定各自的点 – 点接触。这种用法需要相对两个面上的节点在几何上匹配，而且忽略两个面之间的相对滑动。此外，两个面的位移（或转角）必须保持为小量。

11.2.2 问题描述

本例将介绍两个圆柱并排放置，在外力作用下的接触问题。从模型的特点分析，两个圆并列如图 11–4 所示。

本例两圆柱为钢质，半径分别为 0.05 m 与 0.1 m，高为 0.01 m；在径向荷载的作用下发生接触，荷载等效为圆柱轴截面上 1E6Pa 的压力。在此条件下，将为读者介绍其接触部分的应力分析。

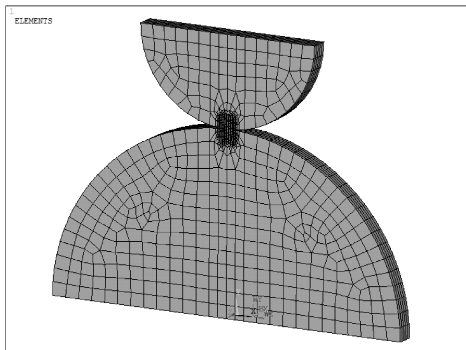


图 11–4 计算模型

11.2.3 分析求解

建立模型的时候，先建立平面模型，划分网格后再拉伸为三维模型。

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，弹出 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。

在该窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 框中输入工作目录，在 Job Name 框中输入项目名称 11－1。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。

（2）本例由于是接触问题，需要定义 4 种单元类型，即平面实体单元（因为要先建立平面模型）、三维实体单元（拉伸为三维模型）、接触单元、目标单元。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，弹出图 11-5 所示的 Library of Element Types 对话框。

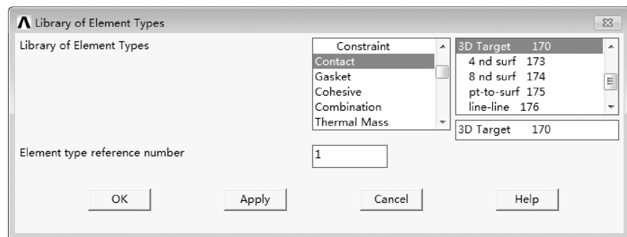


图 11-5　Library of Element Types 对话框

通过该对话框添加多个单元类型，其中 1 号单元为 PLANE183、2 号单元为 SOLID186、3 号单元为 TARGE170、4 号单元为 CONTA174（注意图 11-5 中的 TARGE170 单元与 CONTA174 的位置，位于 Contact 分类下）。

完成单元类型添加后，回到图 11-6 所示的 Element Types 对话框。

选择 Type 4 CONTA174，单击 Options 按钮，在弹出的图 11-7 所示 CONTA174 element type options 对话框中设置 Auto CNOF/ICONT adjustment K5 为 Close gap，单击 OK 按钮。关闭图 11-6 所示的 Element Types 对话框。

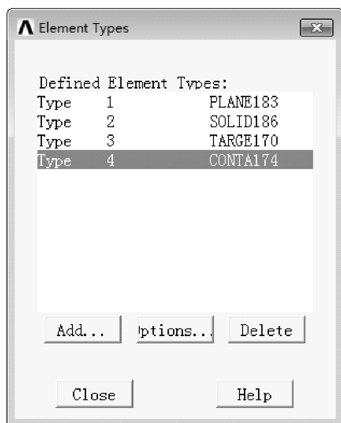


图 11-6　Element Types 对话框

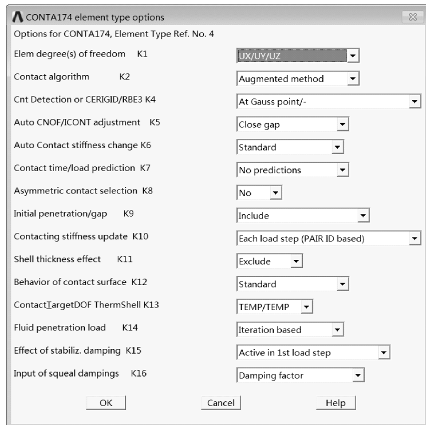


图 11-7　CONTA174 element type options 对话框

（3）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，弹出图 11-8 所示的 Element Type for Real Constants 对话框，选择 TYPE 4 CONTA174。

单击 OK 按钮，弹出图 11-9 所示的 Real Constant Set Number 1,for CONTA174 对话框，设置 Normal penalty stiffness（法向接触刚度）为 0.1，单击 OK 按钮。

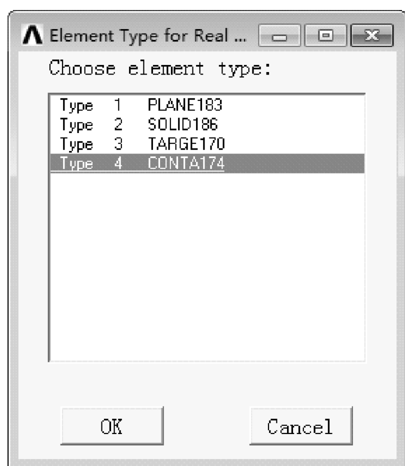


图 11-8 Element Type for Real Constants 对话框

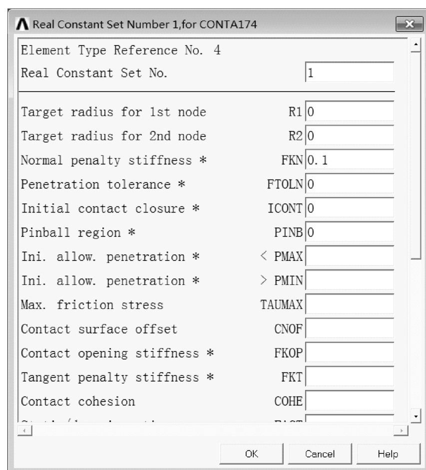


图11-9 Real Constant Set Number 1,for CONTA174 对话框

（4）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出图 11-10 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。选择线性弹性各向同性模型，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，设置材料参数如图 11-11 所示。

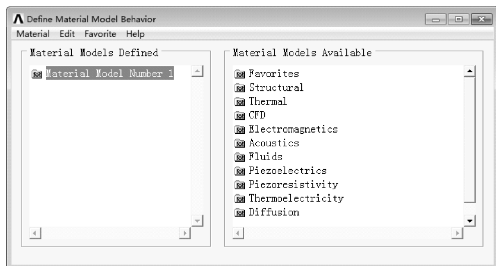


图 11-10 Define Material Model Behavior 对话框

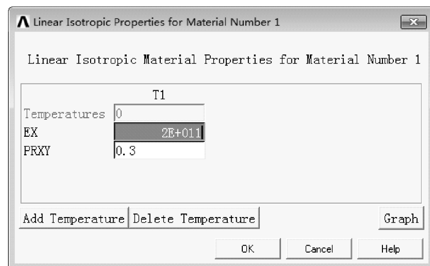


图 11-11 设置线性弹性材料参数

单击 OK 按钮，并关闭图 11-10 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，完成材料参数定义。

（5）完成材料定义后，开始建立几何模型。

在 GUI 界面中选择 Main Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Circle > Partial Annulus 命令，弹出 Part Annular Circ Area 对话框，输入参数如图 11-12 所示。单击 Apply 按钮，生成第 1 个半圆，如图 11-13 所示。

继续输入第 2 个半圆的参数，X = 0，Y = 0.15，Rad - 1 = 0.05，Theta - 1 = - 180，Rad - 2 = 0，Theta - 2 = 0，单击 OK 按钮，完成平面模型的建立，如图 11-14 所示。

（6）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > WorkPlane > Offset WP by Increments 命令，弹出 Offset WP 对话框。

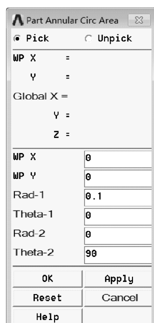


图 11-12 Part Annular Circ Area 对话框

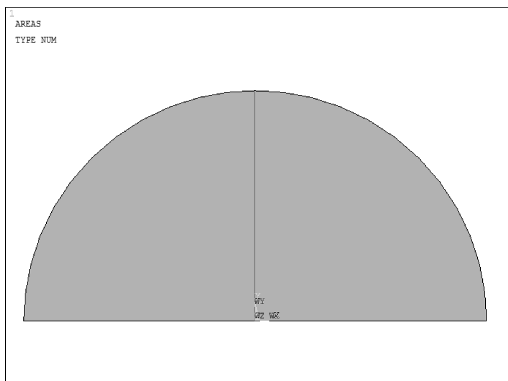


图 11-13 生成第一部分模型

在 X 、Y、Z Offsets 框中输入 0.1，如图 11-15 所示。单击 +X 按钮，将工作平面沿 X 轴正方向移动 0.1。然后在 XY、YZ、ZX Angles 框中输入 90，单击Z-按钮，将工作平面旋转 90°。

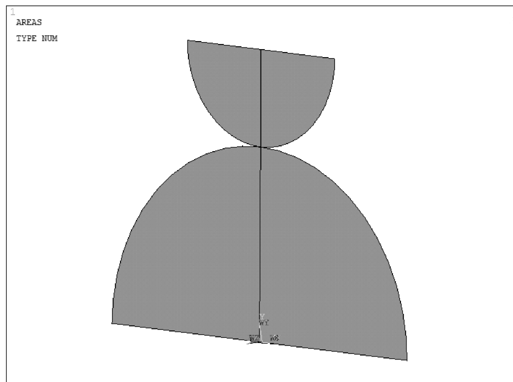


图 11-14 完成平面模型的建立

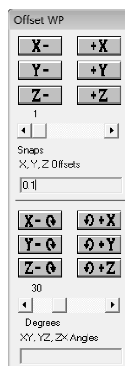


图 11-15 Offset WP 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Area by WrkPlane 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，则工作区中的面被工作平面分割为如图 11-16 所示。

（7）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Areas 命令，弹出 Area Attibutes 对话框，设置面的划分参数如图 11-17 所示。

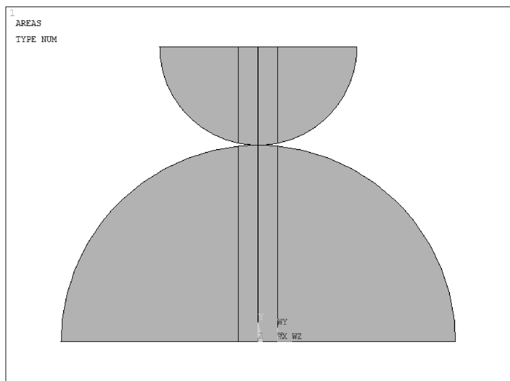


图 11-16 使用工作平面分割面

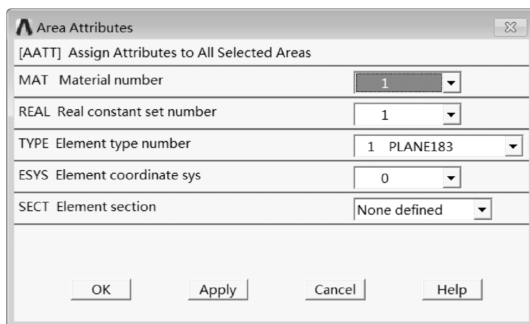


图 11-17 Area Attibutes 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Global > Size 命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，输入单元尺寸 0.0075，如图 11-18 所示。单击 OK 按钮，完成单元尺寸设置。

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，完成网格划分后如图 11-19 所示。

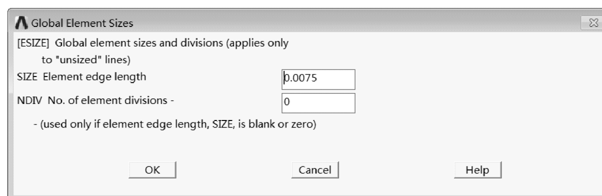


图 11-18　Global Element Sizes 对话框

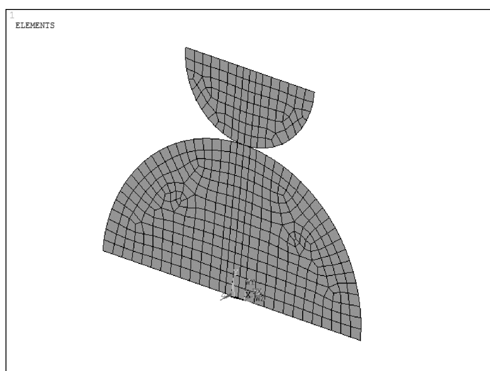


图 11-19　划分网格

（9）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Keypoints 命令，弹出 Refine Mesh at Keypoints 对话框。

在该对话框中输入关键点编号 2 与 4（用英文半角逗号隔开），单击 OK 按钮，弹出图 11-20所示的 Refine Mesh at Keypoint 对话框。

单击 OK 按钮，完成关键点 2 与关键点 4 附近的网格细化，如图 11-21 所示。

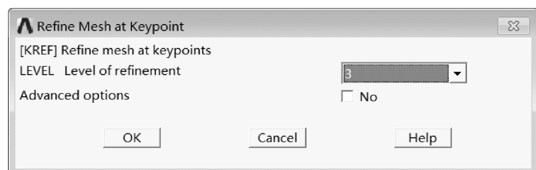


图 11-20　Refine Mesh at Keypoint 对话框

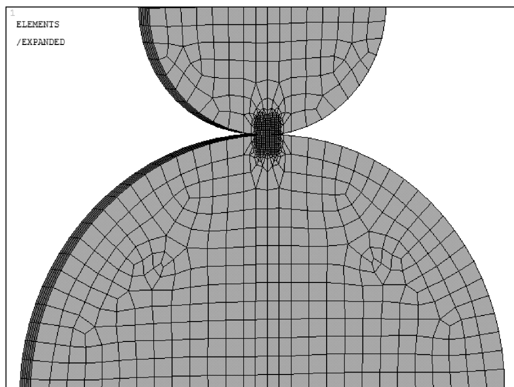
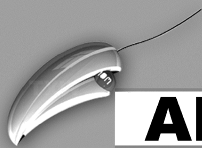


图 11-21　网格局部细化

（10）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs 命令，弹出图 11-22 所示的 Meshing Attributes 对话框，将单元类型改为 2 SOLID186，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Elem Ext Opts 命令，弹出图 11-23 所示的 Element Extrusion Options 对话框。设置 VAL1 No. Elem divs 为 5（拉伸方向分为 5 份），选中 ACLEAR Clear area(s) after ext 右侧的 Yes 复选框（即拉伸



后删除面）。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > By XYZ Offset 命令，拾取工作区中的所有面，单击 OK 按钮，弹出图 11-24 所示的 Extrude Areas by XYZ Offset 对话框。

在 DX，DY，DZ Offsets for extrusion 框中分别输入 0、0、0.01，单击 OK 按钮，完成模型拉伸，如图 11-25 所示。

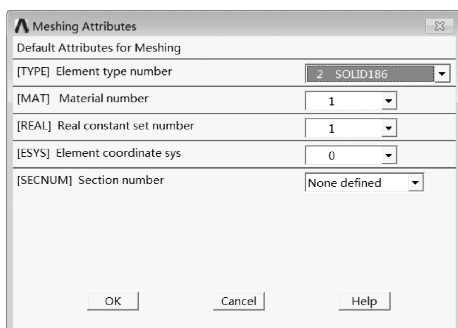


图 11-22 Meshing Attributes 对话框

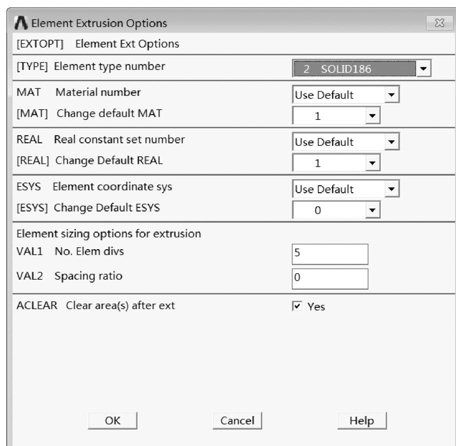


图 11-23 Element Extrusion Options 对话框

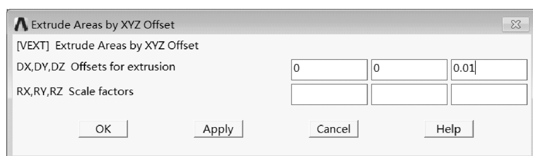


图 11-24 Extrude Areas by XYZ Offset 对话框

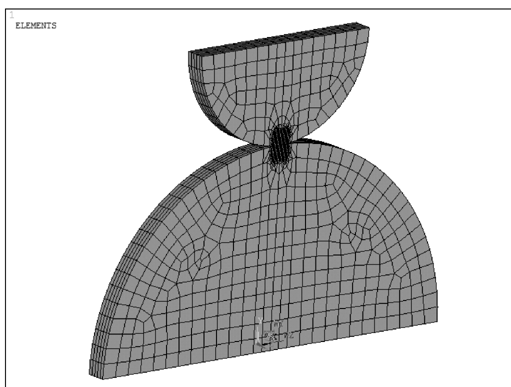


图 11-25 完成拉伸

（11）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot Ctrls > Numbering 命令，弹出图 11-26 所示的 Plot Numbering Controls 对话框。

选中 AREA Area numbers 右侧的 On 复选框，单击 OK 按钮，在工作区中显示面编号，如图 11-27 所示。注意 14 号面的位置。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，先选中 14 号面，如图 11-28 所示。

设置 Select Entities 对话框，选择对象为节点，选择方式为 Attached to，选中 14 号面上的节点，如图 11-29 所示。

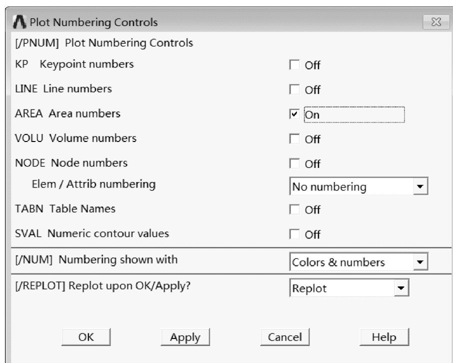


图 11-26 Plot Numbering Controls 对话框

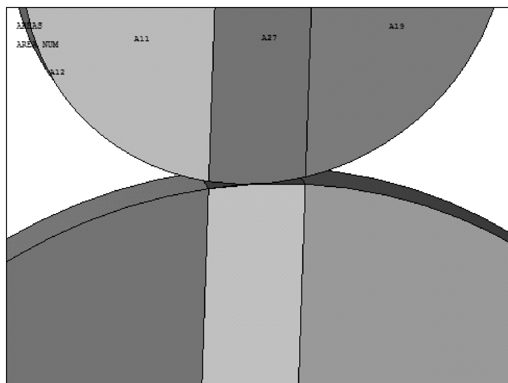


图 11-27 显示面编号

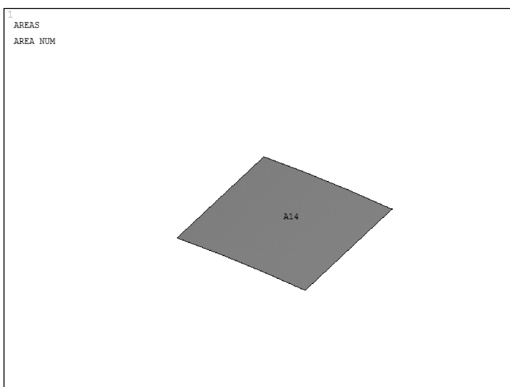


图 11-28 选中 14 号面

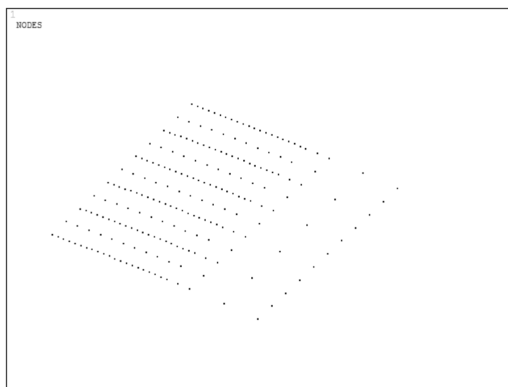


图 11-29 选中 14 号面上的节点

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes 命令，弹出 Element Attributes 对话框，设置单元类型为 3 TARGE170，如图 11-30 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Surf/Contact > Inf Acoustic 命令，在弹出的对话框中单击 OK 按钮，生成目标单元如图 11-31 所示。

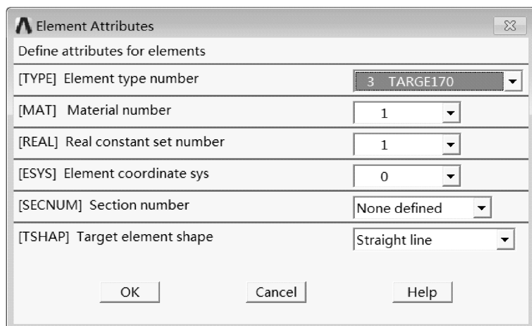


图 11-30 Element Attributes 对话框

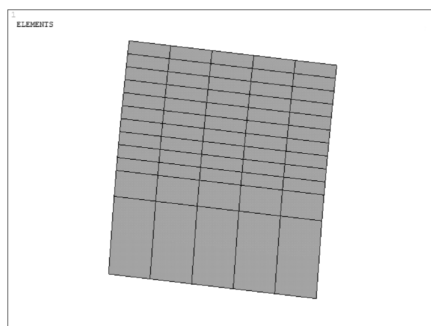


图 11-31 生成目标单元

重复上述操作，在 18 号面上生成接触单元。继续重复操作，在 33 与 38 号面上生成接触单元对。定义完整的接触单元与目标单元如图 11-32 所示。

（12）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas 命令，在弹出的对话框中输入面编号 16 与 8，弹出图 11-33 所示的 Apply U,ROT on Areas 对话框。

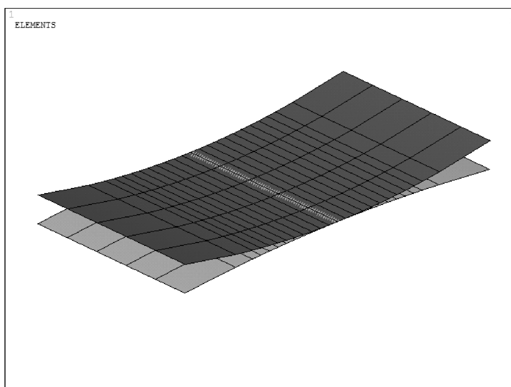


图 11-32 接触单元与目标单元

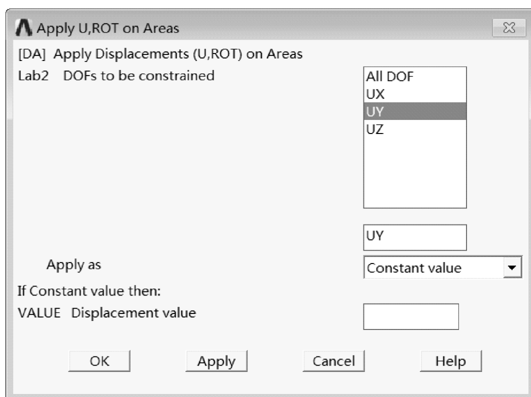


图 11-33 Apply U,ROT on Areas 对话框

选择要约束的自由度为 UY，单击 OK 按钮，完成约束后如图 11-34 所示。

重复上述操作，完成另外一半模型的自由度约束。请读者自己动手练习完成。

（13）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，选出面 11 与 19，如图 11-35 所示。

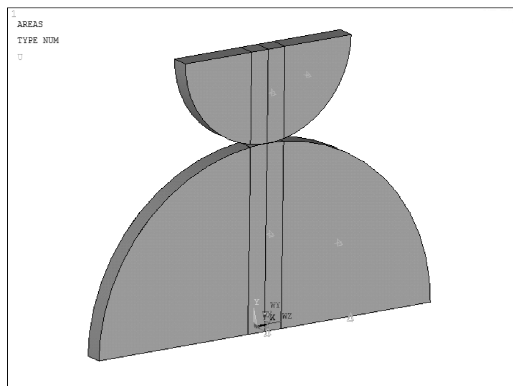


图 11-34 约束 16 号面与 8 号面

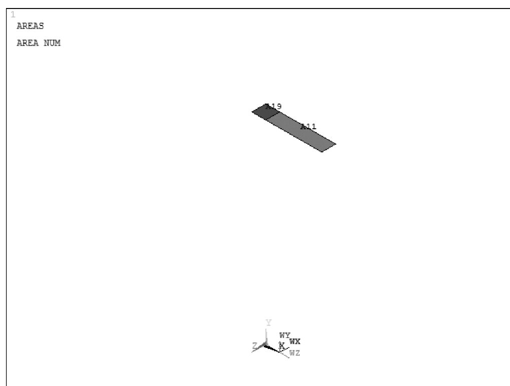


图 11-35 选出加载面

设置 Select Entities 对话框，选择对象改为 Nodes，选择方式为 Attached to，选出面 11 与面 19 上的节点，如图 11-36 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Nodes 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，弹出图 11-37 所示的 Apply PRES on nodes 对话框。

输入压力值 1e6，单击 OK 按钮，完成加载后如图 11-38 所示。

（14）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Coupling/Ceqn > Couple DOFs 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，弹出图 11-39 所示的 Define Coupled DOFs 对话框。

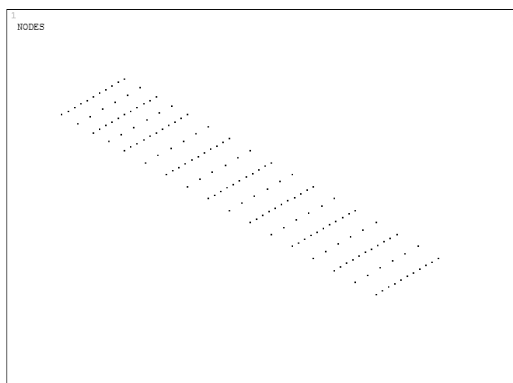


图 11-36 选出加载节点

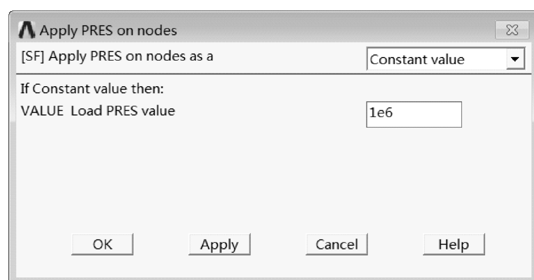


图 11-37 Apply PRES on nodes 对话框

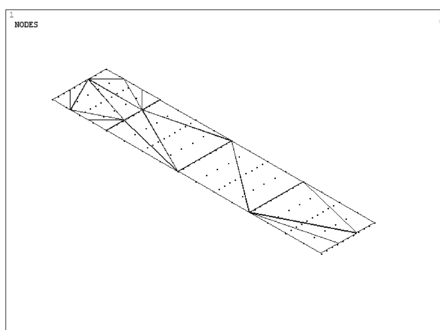


图 11-38 加载



图 11-39 Define Coupled DOFs 对话框

选择耦合自由度为 UY，单击 OK 按钮，效果如图 11-40 所示。

在对称的另一半模型上施加约束，操作步骤与上述相同，完成约束的模型应如图 11-41 所示。

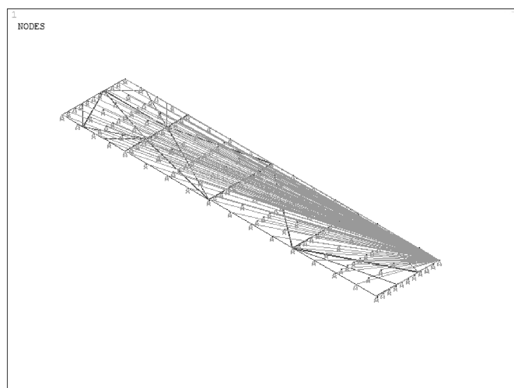


图 11-40 耦合自由度

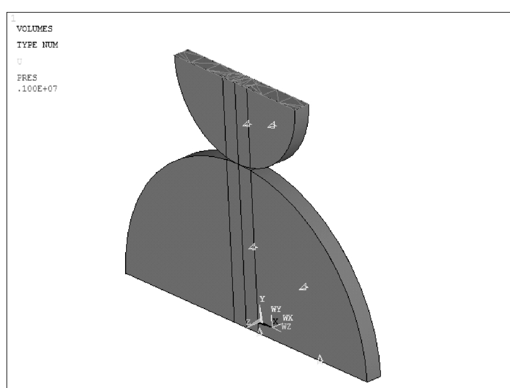


图 11-41 完成约束

（15）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls 命令，弹出 Solution Controls 对话框，在 Basic 选项卡中设置如图 11-42 所示。

打开 Nonlinear 选项卡，设置如图 11-43 所示，然后单击 OK 按钮。

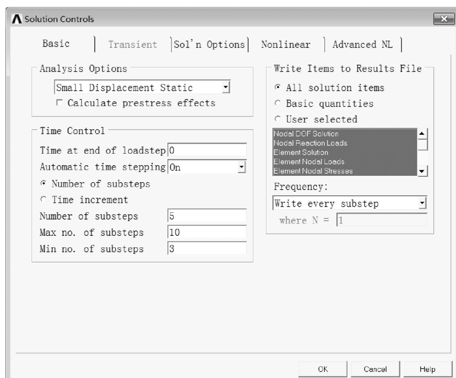


图 11-42　Solution Controls 对话框（Basic 选项卡）

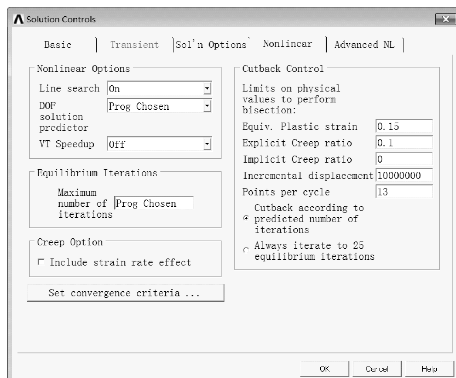


图 11-43　Solution Controls 对话框（Nonlinear 选项卡）

（16）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，弹出图 11-44 所示的 STATUS Command 窗口，其中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 11-45 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

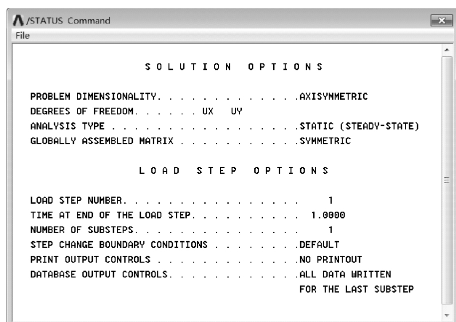


图 11-44　/STATUS Command 窗口

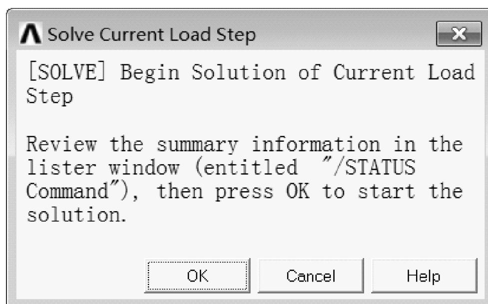


图 11-45　Solve Current Load Step 对话框

单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明求解完成。

本例也可用 APDL 命令流来完成。

```
FINI                                    !
/CLEAR                                  ! 清空工作区
                                        !
/PREP7                                  ! 进入前处理器
ET,1,PLANE183                           ! 定义单元类型
ET,2,SOLID186                           !
ET,3,TARGE170                           !
ET,4,CONTA174,,,,,1                     !
R,1,,,0.1                               ! 实常数
                                        !
MP,EX,1,2E11                            ! 材料属性
MP,PRXY,1,0.3                           !
                                        !
CYL4,0,0,0.1,0,0,180                    ! 生成半圆
```



```
CYL4,0,0.15,0.05,-180,0,0             ! 进入前处理器
                                      ! 定义单元类型
WPOFF,-0.01                           !
WPROT,0,0,90                          !
ASBW,ALL                              !
                                      ! 实常数
AATT,1,1,1                            !
ESIZE,0.0075                          ! 材料属性
MSHAPE,0                              !
MSHKEY,0                              !
AMESH,ALL                             ! 生成半圆
                                      !
KREFINE,2,4,2,3                       ! 局部细化
                                      !
TYPE,2                                ! 拉伸生成圆柱
EXTOPT,ESIZE,5                        !
EXTOPT,ACLEAR,1                       !
VEXT,ALL,,,,,0.01                     !
                                      !
ASEL,S,,,14                           ! 生成接触关系
NSLA,S,1                              !
REAL,1                                !
TYPE,3                                !
ESURF                                 !
ALLS                                  !
                                      !
ASEL,S,,,18                           !
NSLA,S,1                              !
REAL,1                                !
TYPE,4                                !
ESURF                                 !
ALLS                                  !
FINISH                                !
                                      !
/SOLU                                 ! 进入求解器
DA,16,UY                              ! 定义约束
DA,8,UY                               !
DA,15,UX                              !
DA,20,UX                              !
DA,1,UZ                               !
DA,9,UZ                               !
DA,13,UZ                              !
DA,17,UZ                              !
                                      !
ASEL,S,,,11,19,8                      !
NSLA,S,1                              !
SFA,ALL,1,PRES,1E6                    ! 施加荷载
CP,1,UY,ALL                           !
ALLS                                  !
                                      !
LNSRCH,ON                             ! 求解配置
AUTOTS,ON                             !
NSUBST,5,10,3                         !
OUTRES,ALL,ALL                        !
SOLVE                                 !
FINISH                                !
```

```
                                        !
/POST1                                  ! 后处理命令,建议以 GUI 方式操作
ESEL,S,TYPE,,4                          !
ETABLE,PRES,CONT,PRES                   !
ETABLE,ST,CONT,STAT                     !
ETABLE,GAP,CONT,GAP                     !
ESORT,ETAB,PRES,0                       !
PRETAB,PRES,ST,GAP,PENE                 !
FINISH                                  !
```

完成求解后进入后处理器。

（17）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape 命令，弹出图 11-46 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

在该对话框中选中 Def + undef edge 单选按钮，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示如图 11-47所示的变形图。

（18）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 11-49 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution > DOF Solution > Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中看到位移云图，如图 11-50 所示。

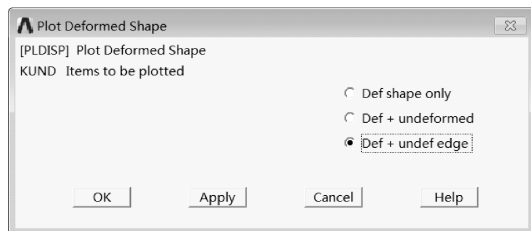


图 11-46 Plot Deformed Shape 对话框

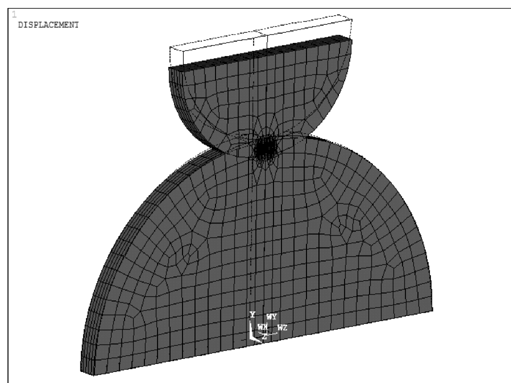


图 11-47 变形图

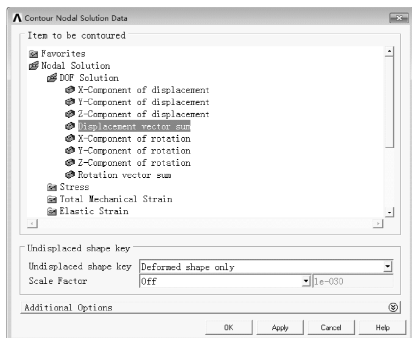


图 11-48 Contour Nodal Solution Data 对话框

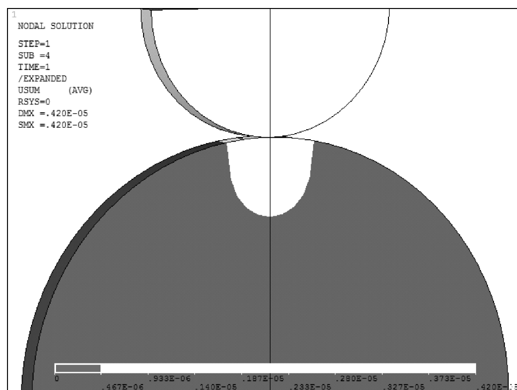


图 11-49 显示位移

采用同样的方法显示应力云图，如图 11-50和图 11-51 所示。

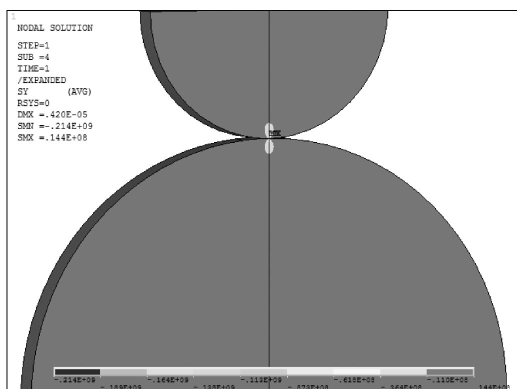


图 11-50　Y 方向应力云图

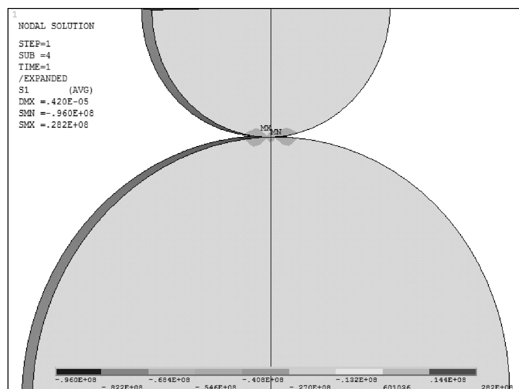


图 11-51　第 1 主应力云图

（19）单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出 Exit 对话框。选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS。

11.3　复合材料分析

复合材料由一种以上具有不同结构性质的材料构成，其主要优点是具有很高的比刚度（刚度与重量之比）。在工程应用中，典型复合材料有纤维和叠层型材料，如玻璃纤维、玻璃环氧树脂、石墨环氧树脂、硼环氧树脂等。

11.3.1 概述

复合材料作为结构应用已有相当长的历史。在现代，复合材料构件已被大量应用于飞行器结构、汽车、体育器材及许多消费产品中。

ANSYS 提供了一种特殊单元——层单元来模拟复合材料。利用这些单元就可以进行任意的结构分析了（包括非线性，如大挠度和应力刚化等问题）。对于热、磁、电场分析，目前尚未提供层单元。

下面重点介绍如何建立复合材料模型。

与铁或钢等各向同性材料相比，建立复合材料的模型要复杂一些。由于各层材料性能为任意正交各向异性，材料性能与材料主轴取向有关，在定义各层材料的性能和方向时要特别注意。

1. 选择合适的单元类型

用于建立复合材料模型的单元类型有 5 种，分别是 SHELL99、SHELL91、SHELL181、SOLID46 和 SOLID191。具体应选择哪一种单元，要根据具体应用和所需计算结果类型等来确定。所有的层单元允许失效准则计算。

（1）SHELL99——线性层状结构壳单元。

SHELL99 是一种 8 节点三维壳单元，每个节点有 6 个自由度。该单元主要适用于薄到中等厚度的板和壳结构，一般要求宽厚比应大于 10。对于宽厚比小于 10 的结构，则应考虑选

用 SOLID46 来建立模型。SHELL99 允许有多达 250 层的等厚材料层，或者 125 层厚度在单元面内呈现双线性变化的不等厚材料层。如果材料层大于 250，用户可通过输入自己的材料矩阵形式来建立模型。此外，还可以通过一个选项将单元节点偏置到结构的表层或底层。

（2）SHELL91——非线性层状结构壳单元。

SHELL91 与 SHELL99 有些类似，只是它允许复合材料最多只有 100 层，而且用户不能输入自己的材料性能矩阵。但是，SHELL91 支持塑性、大应变行为以及一个特殊的“三明治”选项，而 SHELL99 则不能。另外，SHELL91 更适用于大变形的情况。

（3）SHELL181——有限应变壳单元。

SHELL181 是 4 节点三维壳单元，每个节点有 6 个自由度。该单元支持所有的非线性功能（包括大应变），允许有多达 250 层材料层。应该通过截面命令，而不是实常数来定义层的信息。可以通过 FC 命令来指定失效准则。

（4）SOLID46——三维层状结构体单元。

SOLID46 是 8 节点三维实体单元 SOLID45 的一种叠层形式，其每个节点有 3 个自由度（UX、UY、UZ）。它可用来建立叠层壳或实体的有限元模型，每个单元允许有多达 250 层的等厚材料层，或者 125 层厚度在单元面内呈现双线性变化的不等厚材料层。

该单元的另一个优点是可以用叠加几个单元的方式来对多于 250 层的复合材料建立模型，并允许沿厚度方向的变形斜率连续。用户也可输入自己的本构矩阵。SOLID46 调整横向的材料特性，以允许在横向上为常应力。

与 8 节点壳单元相比，SOLID46 的阶次要低些。因此，如在壳结构应用中要得到与 SHELL91 或 SHELL99 相同的求解精度，需要更密的网格。

（5）SOLID191——层状结构体单元。

SOLID191 是 20 节点三维实体单元 SOLID95 的一种叠层形式，其每个节点有 3 个自由度（UX、UY、UZ）。它可用来建立厚的叠层壳或实体的有限元模型，每个单元允许有多达 100 层的材料层。与 SOLID46 类似，SOLID191 可以模拟厚度上的不连续。SOLID46 可以调整横向的材料特性，以允许在横向上为常应力。这个单元不支持非线性材料或大挠度。

除上述层单元外，还有其他一些具有层功能的单元。

- SOLID95：20 节点的结构实体单元。在 KEYOPT(1) = 1 时，其作用与单层的 SOLID191 单元类似，包括应用方位角和失效准则，还允许非线性材料和大挠度。
- SHELL63：4 节点壳单元，可用于对“三明治”壳结构进行粗糙、近似的计算。像两块金属片之间夹有一层聚合物的问题就很典型，此时聚合物的弯曲刚度相对于金属片的弯曲刚度来说是一个小量。用户可以用实常数 RMI 来修正单元的弯曲刚度，使其等效于由金属片引起的弯曲刚度。从中面到外层纤维的距离（实常数 CTOP 和 CBOT）可用来获得“三明治”壳的表层输出应力。
- SOLID65：三维钢筋混凝土实体单元，可以模拟在 3 个用户指定方向配筋的各向同性介质。
- BEAM188 和 BEAM189：三维有限应变梁单元，其截面可以包含多种材料。

2. 定义材料的叠层结构

复合材料最重要的特征就是其叠层结构。每一层都有可能由不同的正交各向异性材料构成，并且其主方向也可能各不相同。对于叠层复合材料，纤维的方向决定了层的主方向。有

两种方法可用来定义材料层的配置：

- 通过定义各层材料的性质。
- 通过定义表示宏观力、力矩与宏观应变、曲率之间相互关系的本构矩阵（只适用于 SOLID46 和 SHELL99）。

（1）定义各层材料的性质。

这种方法由下到上，一层一层定义材料层的配置。底层为第 1 层，后续的层沿单元坐标系的 Z 轴正方向自底向上叠加。如果叠层结构是对称的，可以只定义一半的材料层。

有时，某个物理层可能只延伸到模型的一部分。为了建立连续的层，可以把这些中断的层的厚度设置为。如图 11-52 所示的 4 层模型，其中第 2 层在某处中断了。

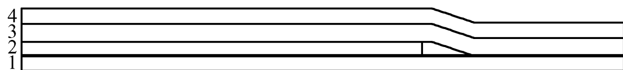


图 11-52　有中断层的叠层模型

对于每一层材料，由单元实常数表（R;RMOKE,RMODIF）（GUI 菜单路径：Maim Menu > Preprocessor > Real Constants）定义如下性质：

- 材料性质（通过材料参考号 MAT 来定义）。
- 层的定向角（THETA）。
- 层的厚度（TK）。

分层的截面可以通过截面工具来定义（Prep > Sections > Shell – Add/Edit）。对每一层，通过截面命令或截面工具（SECTYPE，SECDATA）定义下面的属性。

- 材料性质（通过材料参考号 MAT 来定义）。
- 层的定向角（THETA）。
- 层的厚度（TK）。
- 每层积分点的数目（NUMPT）。

① 材料性质。与其他单元一样用 MP 命令 GUI 菜单路径：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural Implicit > Linear > Elastic > Isotropic 或 Orthotropic）定义线性材料特性，用 TB 命令定义非线性数据表（塑性仅可以用于 SOLID191 和 SHELL91 单元）。唯一不同的是，复合材料单元的材料参考号由其实常数表来指定。对于层单元，MAT 命令（Main Menu > Preprocessor > – Meshing – Attributes > Default Attribs）属性仅用于 MP 命令的 DAMP 和 REFT 参数。各层的线性材料特性可以是各向同性，也可以是正交异性。典型的纤维加强复合材料包括各向异性材料，且这些特性主要以主泊松比的形式提供。材料方向平行于层坐标系（由单元坐标系和层定向角定义）。

② 层的定向角：定义层坐标系相对于单元坐标系的角度。它是这两个坐标系的 X 轴之间的夹角（单位为“度”）。默认情况下，层坐标系与单元坐标系平行。所有单元都有默认的坐标系，可用 ESYS 命令（GUI 菜单路径：Main Menu > Preprocessor > Attributes > Default Attribs）来改变。用户还可用自己的子程序来定义单元坐标系和层坐标系。

③ 层的厚度：如果层的厚度是常数，用户只需定义节点 I 处的厚度 TK（I），否则 4 个角节点处的厚度都需输入。中断的层必须为零厚度。

④ 每层的积分点数目：用于确定计算结果的详细程度。对于非常薄的层，当它和很多其他层一起使用时，有一个积分点就足够了。但对于层数很少的片状结构，需要的积分点就应该比较多，默认为3。该特性仅适用于通过截面命令定义的截面。

（2）定义本构矩阵。

定义本构矩阵是定义各层材料性质的另一种方式，适用于 SOLID46 和 SHELL99（通过设置其 KEYOPT（2））。该矩阵表示了单元的力－力矩与应变－曲率的关系，必须在 ANSYS 外进行计算。它们可以通过 KEYOPT（1）设置为求解输出的一部分。这种方法的主要优点是：

- 它允许用户合并聚合复合材料的性质。
- 支持热荷载向量。
- 可表示层数无限制的材料。

矩阵的元素作为实常数来定义。通过定义单元平均密度（实常数 AVDENS）还可以将质量影响考虑进去。但是，使用了这种方法时，由于没有输入每层材料各自的信息，就不能得到每层材料的详细结果。

3. 定义失效准则

失效准则用于获知在所加荷载下，各层是否失效。用户可从3种预定义好了的失效准则中选择失效准则，或者自定义多达6种的失效准则。3种预定义失效准则是：

- 最大应变失效准则，它允许有9个失效应变。
- 最大应力失效准则，它允许有9个失效应力。
- Tsai－Wu 失效准则，它允许有9个失效应力和3个附加的耦合系数。

失效应变、应力和耦合系数可以是与温度相关的。

定义失效准则需要注意如下问题。

- 失效准则是正交各向异性的，因此用户必须输入所有方向上的失效应力或失效应变值（在压缩值等于拉伸值时例外）。
- 如果不希望在某个特定的方向上检查失效应力或失效应变，则在那个方向上定义一个大值。
- 可通过用户子程序 USRFC1～USRFC6 自定义失效准则。这些子程序应事先与 ANSYS 程序做好连接。

4. 应遵循的建模和后处理规则

在复合材料单元的建模和后处理中，一些附加规则如下。

- 复合材料会体现出几种类型的耦合效应，如弯扭耦合、拉弯耦合等。这是由具有不同性质的多层材料互相重叠引起的。其结果是，如果材料层的积叠顺序是非对称的，则即使模型的几何形状和荷载都是对称的，也不能按照对称条件只求解一部分模型，因为结构的位移和应力可能不对称。
- 在模型自由边界上的层间剪切应力通常都是很重要的。要求得在这些部位相对精确的层间剪切应力，则模型边界上的单元尺寸应约等于总的叠层厚度。对于壳来说，增加实际材料层数并不一定提高层间剪切应力的求解精度。但是，如果采用 SOLID46、SOLID95、SOLID191 单元，则沿厚度方向上的叠加单元会使得沿厚度方向上层间应力的求解更为精确。壳单元的层间横向剪应力的计算基于单元上、下表面不承受应力的假设。这些层间剪应力只在单元的中心处计算，而不是沿着单元边界。建议使用壳－

实体子模型精确计算自由边界的层间应力。

- 因为复合材料的求解需要大量的输入数据，故在求解之前应对这些数据进行检验。

11.3.2 复合材料梁的分析

本例将对一个由复合材料制作的工字梁进行分析。

如图 11-53 所示，有一长 3 m 的工字梁，高度为 0.3 m，上下翼缘的宽度为 0.2 m。材料为 T300/5208，是 20 层对称分布叠层板，每层的厚度为 0.001 m，各层的方向角分别为 0°、45°、90°、-45°、0°、0°、45°、90°、-45°和 0°。材料特性为：E_x = 181 GPa，E_y = E_z = 10.3 GPa，G_{xy} = 7.17 GPa，G_{yz} = 3.78 GPa，ν_{12} = 0.016。轴向强度：σ_{x+} = 1500 MPa，σ_{x-} = 1500 MPa，σ_{y+} = 40 MPa，σ_{y-} = 246 MPa，σ_{z+} = 40 MPa，σ_{z-} = 246 MPa，τ_{xy} = 68 MPa（+表示受拉，-表示受压）。工字梁一端固定，另一端受集中力（分别为 100 N 、10000 N 和 100 N）。计算工作应力和应变、失效应力和失效层等。

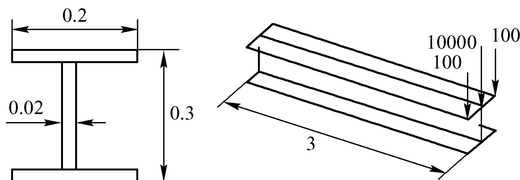


图 11-53 模型示意图

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Environment、Lisence、Working Directory（工作目录）和 Job Name（项目名称），单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。

（2）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出图 11-54 所示的 Library of Element Types 对话框，选择单元类型为 Shell > 3D 4node 181（即 SHELL181）。

回到 Element Types 对话框，选择 SHELL181 单元，单击 Options 按钮，弹出 SHELL181 element type options 对话框，设置如图 11-55 所示。

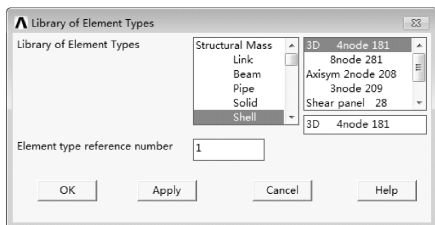


图 11-54 Library of Element Types 对话框

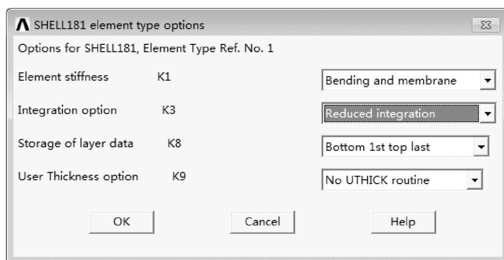


图 11-55 SHELL181 element type options 对话框

（3）接下来定义材料模型。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出

图 11-56 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。

选择 Structural > Linear > Elastics orthotropicl 线性、弹性、各向异性材料，弹出 Linear Orthotropic Properties for Material Number 1 对话框，输入材料参数如图 11-57 所示。

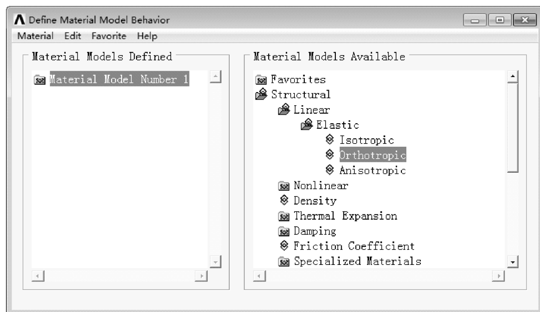


图 11-56 Define Material Model Behavior 对话框

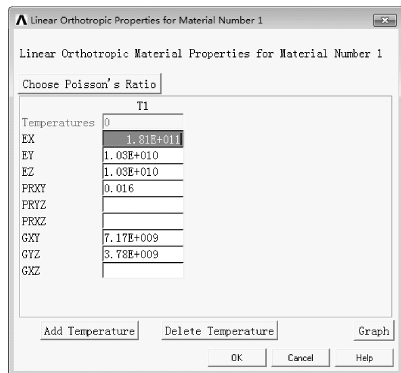


图 11-57 各向异性材料参数

（4）完成单元类型与材料模型定义后，定义壳的厚度。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Shell > Lay - up > Add / Edit 命令，弹出 Create and Modify Shell Sections 对话框，如图 11-58 所示。

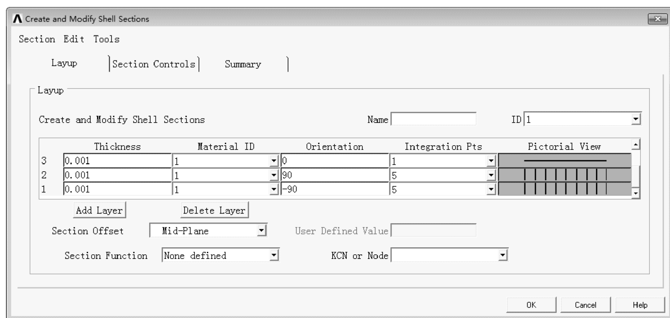


图 11-58 Create and Modify Shell Sections 对话框

单击 Add Layer 按钮，添加 20 个层，定义每层的厚度与方向角如图 11-58 所示。

（5）运行如下命令进行强度参数的定义。

```
TB,FAIL,1
TBTEMP,,CRIT
TBDATA,1,0,0,1
TBTEMP,20
TBDATA,10,1500E6
TBDATA,11,-1500E6
TBDATA,12,40E6
TBDATA,13,-246E6
TBDATA,14,40E6
TBDATA,15,-246E6
TBDATA,16,68E6
```

（6）完成材料参数定义后，开始模型的建立。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS

命令，弹出图 11-59 所示的 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，输入 1 号关键点的坐标（0，0，0）。单击 Apply 按钮，继续输入关键点坐标，直至完成表 11-1 所示的关键点坐标的输入。

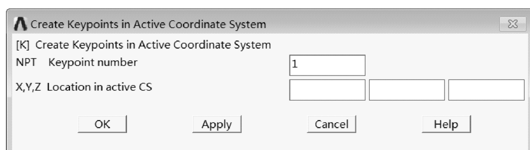


图 11-59　Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

表 11-1　关键点坐标

关键点编号	X	Y	Z
1			
2	3		
3	3	0. 3	
4	0	0. 3	
5	0	0	0. 1
6	3	0	0. 1
7	3	0	-0. 1
8	0	0	-0. 1
9	0	0. 3	0. 1
10	3	0. 3	0. 1
11	3	0. 3	-0. 1
12	0	0. 3	-0. 1

完成定义的关键点如图 11-60 所示。

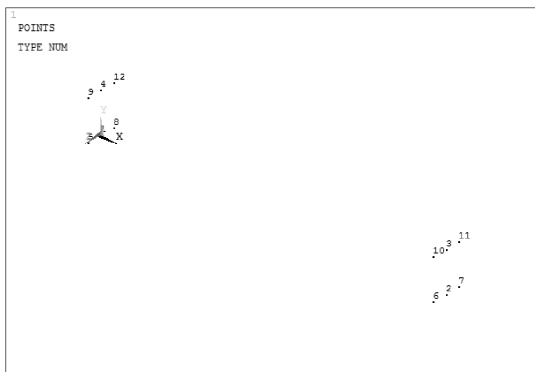


图 11-60　定义关键点

（7）完成关键点定义后，将关键点围成面。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs 命令，拾取 1、2、3、4 号关键点，连接成面。继续生成面，将 5、6、7、8 号关键点，9、10、11、12 号关键点分别连接成面，完成的模型如图 11-61 所示。

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Partition > Areas 命令，选中工作区中的所有面，单击 OK 按钮，完成面的搭接。

（9）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Global > Size 命令，弹出图 11-62 所示的 Global Element Sizes 对话框，设置单元尺寸为 0.1，单击 OK 按钮，完成单元尺寸定义。

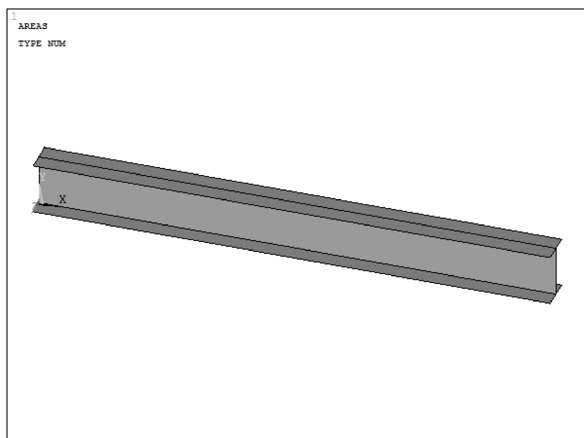


图 11-61　生成面模型

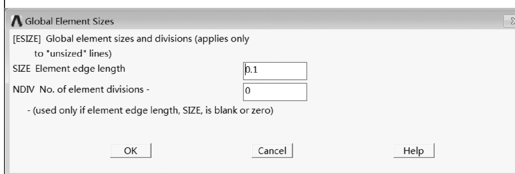


图 11-62　Global Element Sizes 对话框

（10）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 Sided 命令，拾取工作区中的全部面，单击 OK 按钮，完成网格划分，如图 11-63 所示。

（11）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Style > Size and Shape 命令，弹出图 11-64所示的 Size and Shape 对话框。

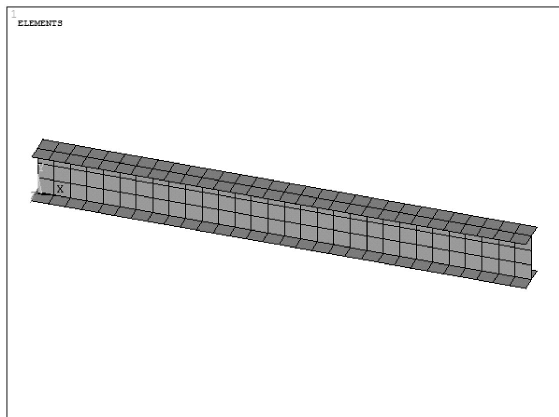


图 11-63　划分网格

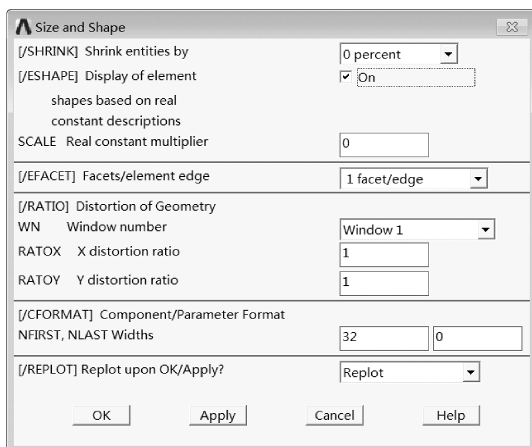


图 11-64　Size and Shape 对话框

选中［/ESHAPE］Display of element 右侧的 on 复选框，单击 OK 按钮，在工作区中显示单元的厚度，如图 11-65 所示。分层的细节如图 11-66 所示。

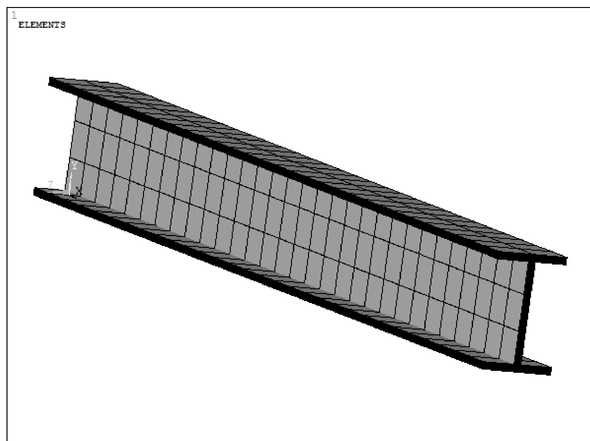


图 11-65　显示单元厚度

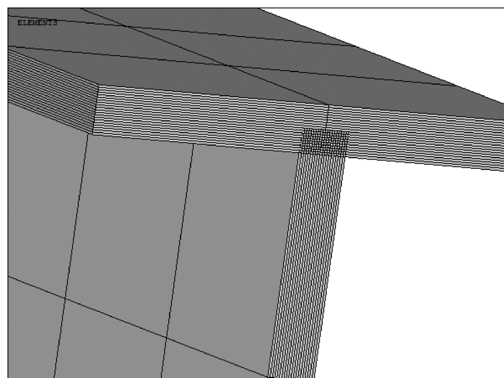


图 11-66　分层细节

（12）进入求解器，在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，利用弹出的 SelectEntities 对话框选出 X = 0 的节点，如图 11-67 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，拾取工作区中的全部节点，弹出图 11-68 所示的 Apply U,ROT on Nodes 对话框。

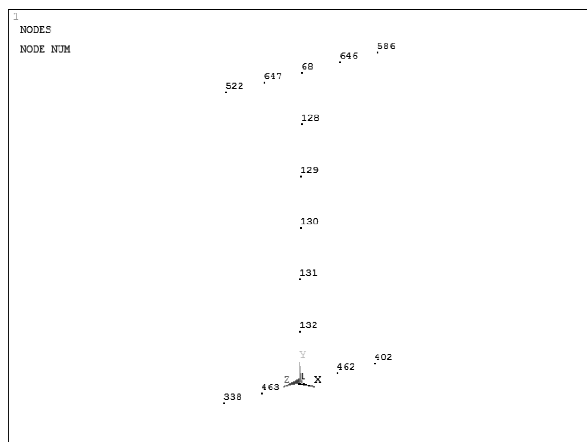


图 11-67　选出端面节点

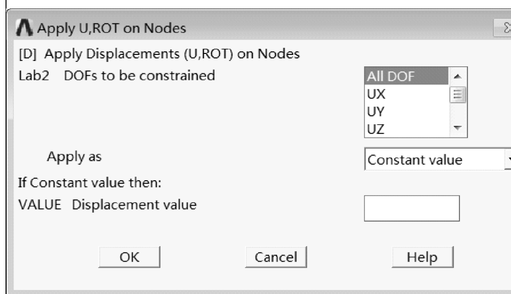


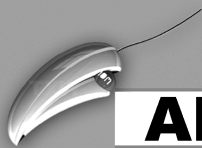
图 11-68　Apply U,ROT on Nodes 对话框

选择要约束的自由度为 All DOF，单击 OK 按钮，完成约束后如图 11-69 所示。

（13）进入求解器，在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，利用弹出的 SelectEntities 对话框选出 X = 3、Y = 0.3、Z = 0 的节点。注意应使用 Reselect。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes 命令，定义荷载为 FY = －10000。

利用 Select Entities 对话框选出 X = 3、Y = 0.3、Z = 0.1 的节点。注意应使用 Reselect。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes 命令，定义荷载为 FY = －100。

利用 Select Entities 对话框选出 X = 3、Y = 0.3、Z = －0.1 的节点。注意应使用 Reselect。



在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes 命令，定义荷载为 FY = －100。

完成荷载定义后如图 11-70 所示。

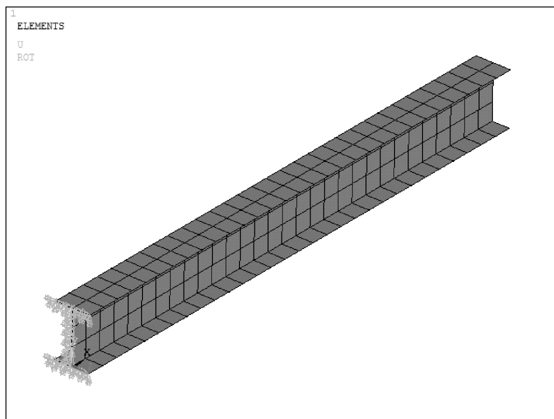


图 11-69 完成约束

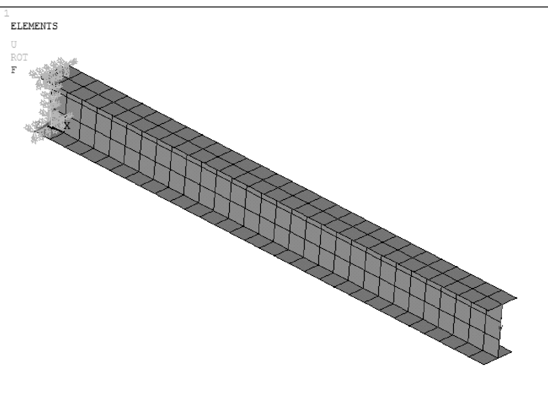


图 11-70 完成荷载（边界条件）定义

（14）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，弹出图 11-71 所示的/STATUS Command 窗口，其中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 11-72 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

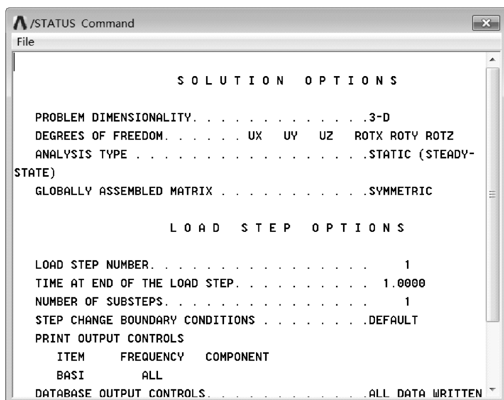


图 11-71 /STATUS Command 窗口

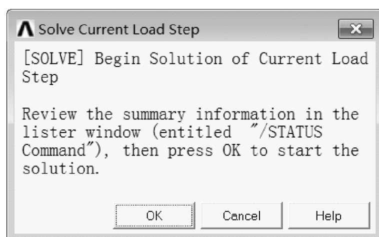


图 11-72 Solve Current Load Step 对话框

单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明求解完成。

（15）完成求解后，用户即可进入通用后处理器进行处理分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape 命令，弹出图 11-73 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

选中 Def + undef edge 单选按钮，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示图 11-74 所示的变形图。

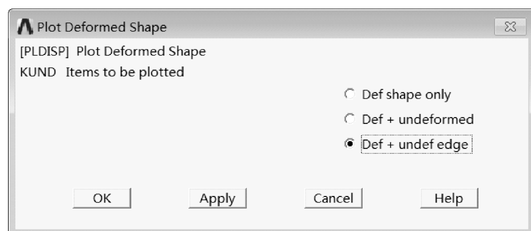


图 11-73 Plot Deformed Shape 对话框

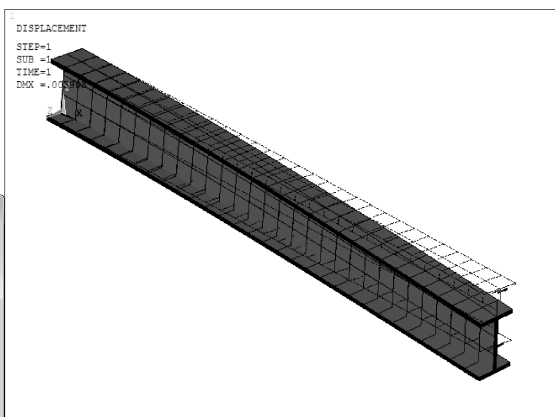


图 11-74 变形图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 11-75 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

在 Item to be Contoured 列表框中选择 Nodal Solution > DOF Solution，Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中看到位移云图，如图 11-76 所示。以同样的方法显示项目的节点解，如图 11-77 ~ 图 11-80 所示。

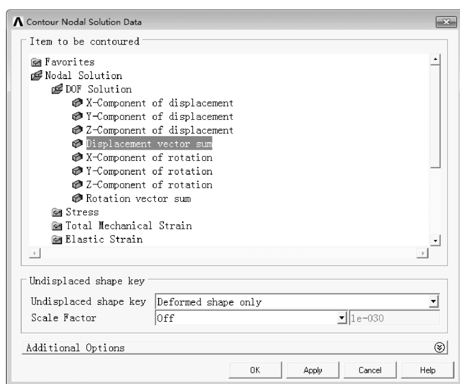


图 11-75 Contour Nodal Solution Data 对话框

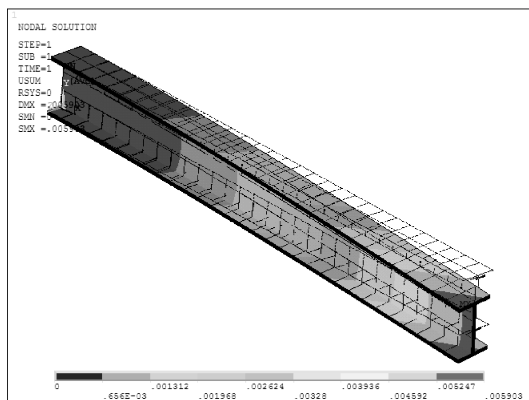


图 11-76 显示位移

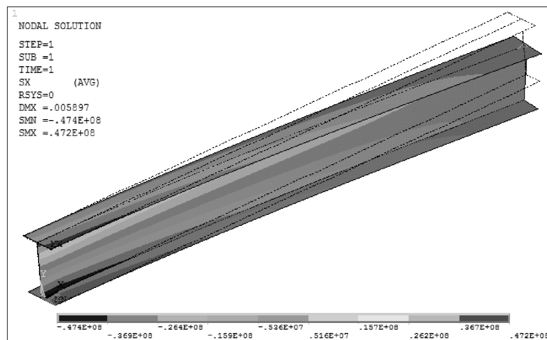


图 11-77 X 方向应力云图

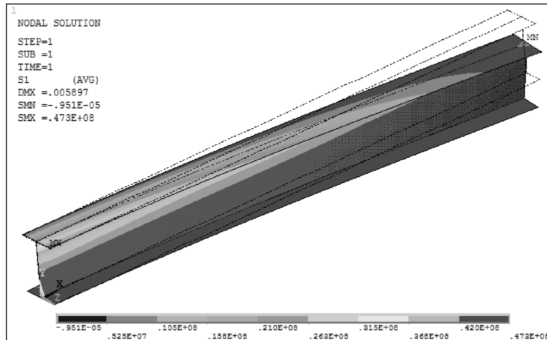
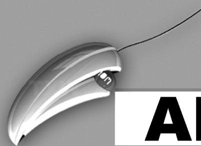


图 11-78 第 1 主应力云图



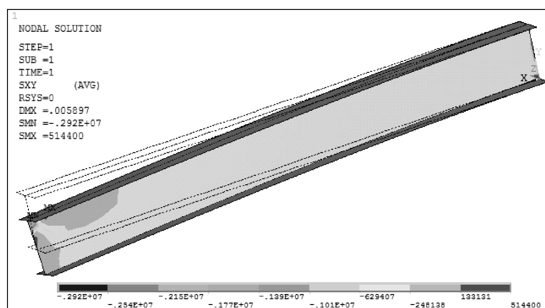


图 11-79 XY 剪应力云图

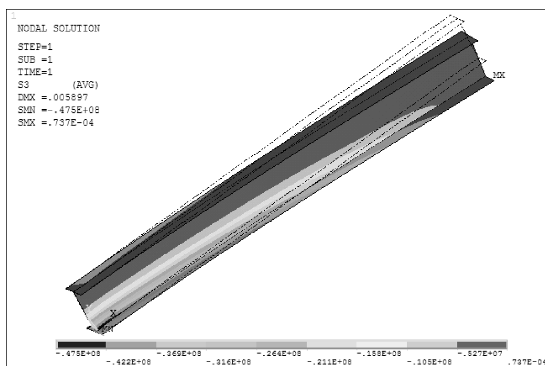


图 11-80 第 3 主应力云图

（16）运行如下后处理命令。

```
/POST1
ETABLE,NX,SMISC,7
ETABLE,FC,NMISC,1
ETABLE,FCMC,NMISC,2
ETABLE,FCLN,NMISC,3
ETABLE,ILMX,NMISC,4
ETABLE,ILLN,NMISC,5
PRETAB,NX,ILLN,ILMX
PRETAB,FC,FCLN,FCMX
```

弹出如图 11-81 和图 11-82 所示的单元列表。

PRETAB Command

File

PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT FC	CURRENT FCLN	CURRENT NX	CURRENT ILLN	CURRENT ILMX
1	3.0000	20.000	-79.224	7.0000	95075.
2	3.0000	20.000	-51.783	12.000	74413.
3	3.0000	20.000	-91.815	12.000	68913.
4	3.0000	20.000	-139.87	7.0000	68715.
5	3.0000	20.000	-174.68	7.0000	68860.
6	3.0000	20.000	-203.34	7.0000	68091.
7	3.0000	20.000	-228.25	7.0000	67127.
8	3.0000	20.000	-250.62	8.0000	66156.
9	3.0000	20.000	-270.91	8.0000	65502.
10	3.0000	20.000	-289.37	8.0000	64715.
11	3.0000	20.000	-306.19	8.0000	63806.
12	3.0000	20.000	-321.52	8.0000	62785.

图 11-81 单元列表（1）

PRETAB Command

File

PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT NX	CURRENT ILLN	CURRENT ILMX
1	-79.224	7.0000	95075.
2	-51.783	12.000	74413.
3	-91.815	12.000	68913.
4	-139.87	7.0000	68715.
5	-174.68	7.0000	68860.
6	-203.34	7.0000	68091.
7	-228.25	7.0000	67127.
8	-250.62	8.0000	66156.
9	-270.91	8.0000	65502.
10	-289.37	8.0000	64715.
11	-306.19	8.0000	63806.
12	-321.52	8.0000	62785.

图 11-82 单元列表（2）

11.4 大变形问题

大变形问题通常采用特征值屈曲分析（即线性屈曲分析）方法。由于特征值屈曲不考虑任何非线性和初始扰动，因此它只是一种学术解。利用特征值屈曲分析可以预测出屈曲荷载的上限，然而在通常情况下我们都期望得到保守荷载（下限）。特征值屈曲分析的优点是计算快。在进行非线性屈曲分析之前，我们可以利用线性屈曲分析了解屈曲形状。

接下来将为读者提供特征值屈曲分析与非线性屈曲分析的实例，希望读者通过自己动手练习，加深对 ANSYS 屈曲分析的理解。

11.4.1 问题描述

一根长为 L，两端铰支的细长杆，受到轴向荷载作用。此杆截面的高度为 h，面积为 A。由于对称性，我们只对杆的上端建模，则上半部分的边界条件变为一端自由、一端固支。为了描述屈曲模态，在 X 方向取 10 个主自由度。杆的惯性矩为 $I = Ah^2/12 = 0.0052038\text{in}^4$。

- 材料特性：E = 30E6psi。
- 几何特性：L = 200in；$A = 0.025\text{in}^2$；h = 0.5in。
- 荷载：F = 1lb。

11.4.2 分析求解

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，弹出 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。

在该窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 框中输入工作目录，在 Job Name 框中输入项目名称 11-3。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。

（2）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，弹出图 11-83 所示的 Library of Element Types 对话框，选择 1 号单元为 Beam > 2node 188，单击 OK 按钮，完成添加。

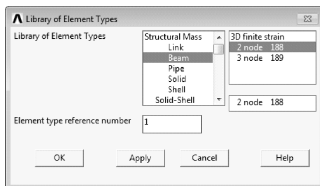


图 11-83 Library of Element Types 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出图 11-84 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。选择材料模型为 Strultural > Linear > Elastic > Isotropic（线性弹性各向同性模型），弹出 Linear Isotropic Properties for material Numberl 对话框，定义弹性模量如图 11-85 所示，单击 OK 按钮，完成材料参数的定义。

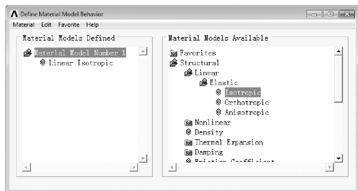


图 11-84 选择材料模型

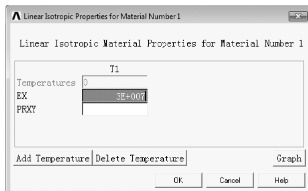


图 11-85 定义弹性模量

（3）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Beam > Common Sections 命令，定义梁单元的截面类型为矩形，宽与高均为 0.5，单击 OK 按钮。

此时建模前准备工作已经完成。

（4）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS 命令，弹出图 11-86 所示的 Create Nodes in Active Coordinate System（按照坐标位置定义节点）对话框。利用此对话框定义两个节点，分别为 1 号节点位于（0,0,0）、11 号节点位

于（0,100,0），完成定义的节点如图 11-87 所示。

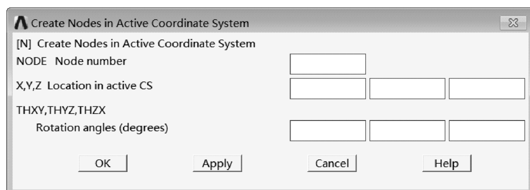


图 11-86　Create Nodes in Active Coordinate System（按照坐标位置定义节点）对话框

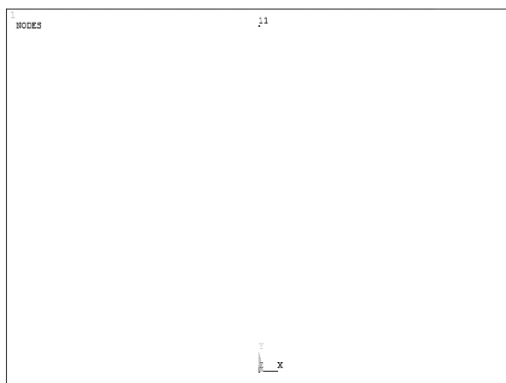


图 11-87　定义 1 号与 11 号节点

（5）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Fill Between Nds 命令，拾取 1 号与 11 号节点，单击 OK 按钮，弹出如图 11-88 所示的 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框，不做改动，直接单击 OK 按钮，完成节点的定义，如图 11-89 所示。

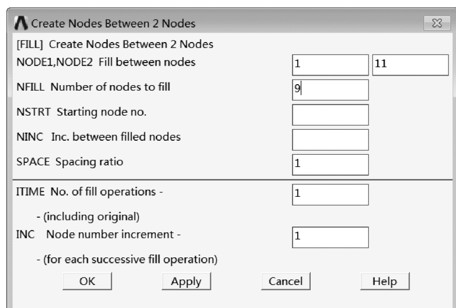


图 11-88　Create Nodes Between 2 Nodes 对话框

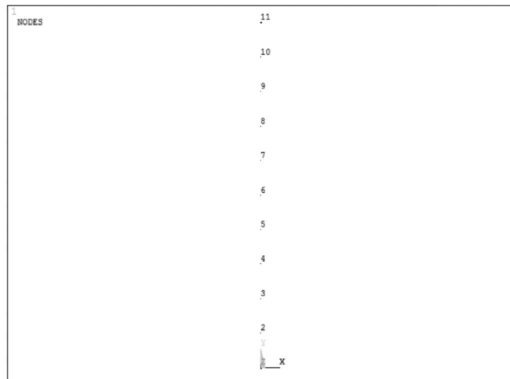


图 11-89　填充节点

（6）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes 命令，拾取 1 号与 2 号节点，单击 OK 按钮，生成单元如图 11-90 所示。

（7）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Elements > Auto Numbered 命令，拾取上一步生成的单元并单击 OK 按钮。在弹出的 Copy Element（Automatically Numbered）（复制单元）对话框中，设置如图 11-91 所示。单击 OK 按钮，生成剩余的单元，如图 11-92 所示。

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 11-93 所示的 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static（即静态分析），单击 OK 按钮。

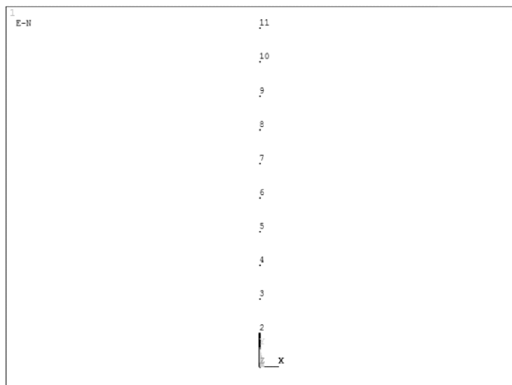


图 11-90 生成单元

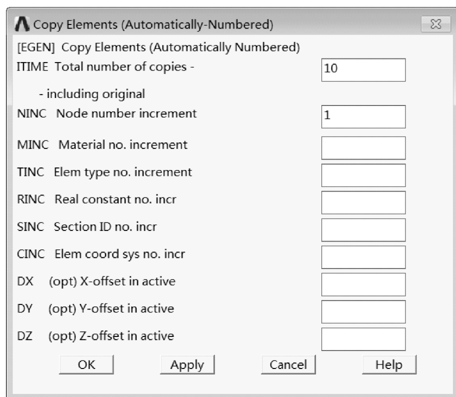


图 11-91 复制单元

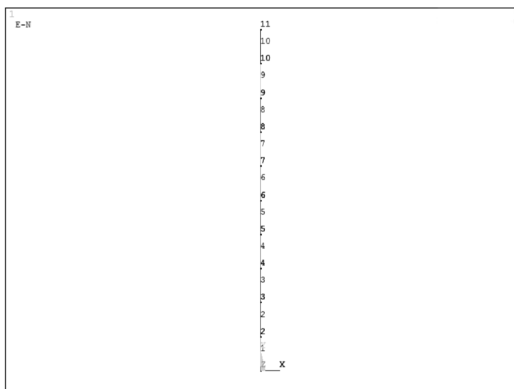


图 11-92 生成余下的单元

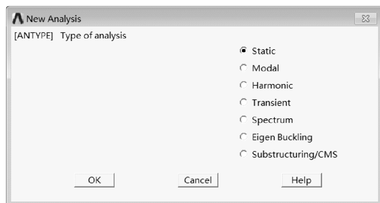


图 11-93 New Analysis 对话框

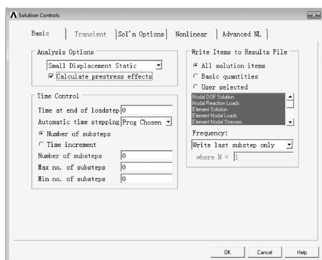


图 11-94 Solution Controls 对话框

（9）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol′n Controls 命令，弹出 Solution Controls 对话框。在 Basic 选项卡中选中 Calculate Prestress effects（计算预应力效应）复选框，如图 11-94 所示，单击 OK 按钮。

（10）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，拾取 1 号节点，单击 OK 按钮。在弹出的如图 11-95 所示 Apply U，ROT on Nodes 对话框中，选择约束 All DOF，单击 OK 按钮，完成约束后如图 11-96所示。

（11）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes 命令，拾取 11 号节点，单击 OK 按钮，在弹出的图 11-97 所示 Apply F/M on Nodes 对话框中，选择加载的方向为 FY，输入载荷值 -1，单击 OK 按钮，完成加载后如图 11-98 所示。

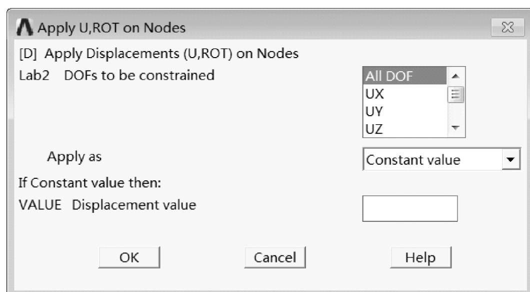


图 11-95 Apply U，ROT on Nodes 对话框

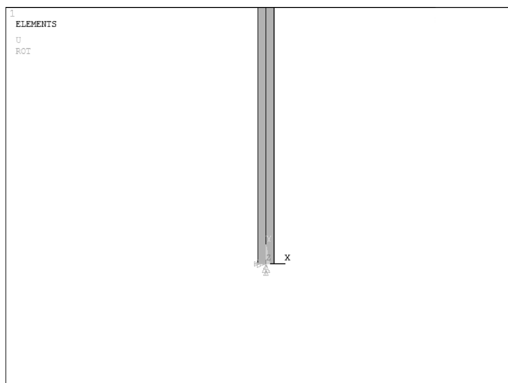


图 11-96 定义约束

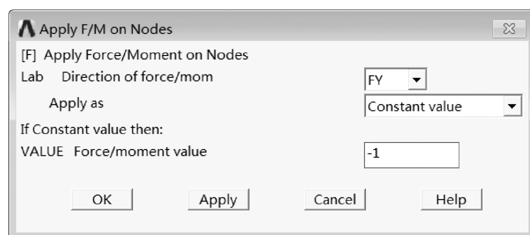


图 11-97 Apply F/M on Nodes 对话框

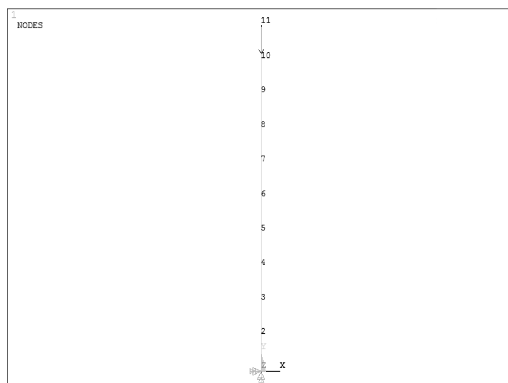


图 11-98 加载

（12）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，单击 OK 按钮，开始求解。

（13）完成求解后，在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 11-99 所示的 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Eigen Buckling，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options 命令，弹出 Eigenvalue Buckling Options 对话框，设置如图 11-100 所示，单击 OK 按钮。

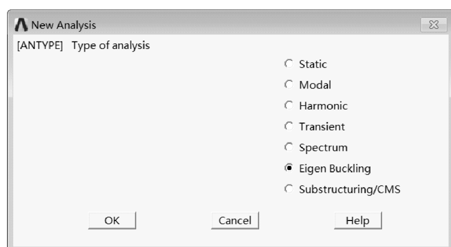


图 11-99 New Analysis 对话框

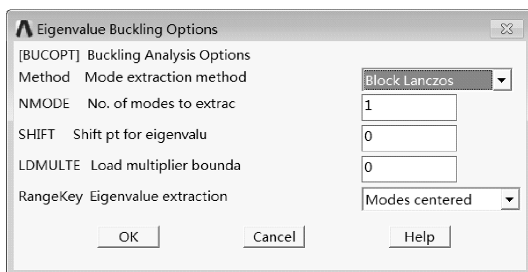


图 11-100 Eigenvalue Buckling Options 对话框

（14）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，单击 OK 按钮，开始求解。

本例也可以用 APDL 命令流来完成。

```
FINI                                    ! 清空工作区
/CLE                                    !
                                        !
/PREP7                                  ! 进入前处理
ET,1,BEAM188                            ! 定义单元
MP,EX,1,30E6                            ! 材料参数
SECTYPE,1,BEAM,RECT                     ! 单元截面
SECDATA,0.5,0.5                         !
                                        !
N,1                                     ! 建模,生成节点
N,11,,100                               !
FILL                                    ! 节点均布填充
E,1,2                                   ! 连接单元
EGEN,10,1,1                             ! 复制单元
FINISH                                  ! 完成前处理
                                        !
/SOLU                                   ! 进入求解器
ANTYPE,STATIC                           ! 分析类型,先进行静态分析
PSTRES,ON                               ! 计算预应力效应
D,1,ALL                                 ! 约束下端
F,11,FY,-1                              ! 加载
SOLVE                                   ! 求解
FINISH                                  ! 完成静态求解
                                        !
/SOLU                                   ! 再次进入求解器
ANTYPE,BUCKLE                           ! 进行屈曲分析
BUCOPT,LANB,1                           ! 设置屈曲分析参数
MXPAND,1                                !
SOLVE                                   ! 求解
FINISH                                  ! 完成
```

(15) 完成求解后，进入后处理器即可查看结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape 命令，弹出图 11-101 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

在该对话框中选中 Def + undef edge 单选按钮，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示图 11-102 所示的变形图。

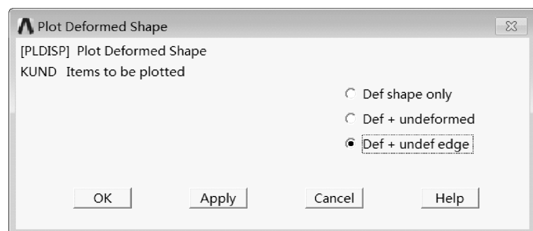


图 11-101 Plot Deformed Shape 对话框

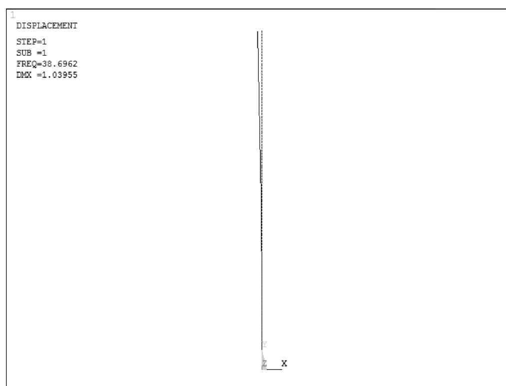


图 11-102 变形图

在图 11-102 左上角可以看到屈曲荷载系数为 38.6962。

(16) 单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出 Exit 对话框。选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS。

11.5 本章小结

非线性分析是 ANSYS 分析的重要组成部分。与线性分析相比，非线性分析更加接近真实问题，但计算起来也更为复杂，难度更高。

进行非线性分析要求用户具有相当的工程力学知识，只有学好材料力学、弹性力学、弹塑性力学等基础力学科目，才能更好地解决复杂的非线性问题。特别是在处理分析过程中出现不收敛问题、结果不理想等情况时，更是需要读者具有一定的工程经验、分析经验与力学知识才能处理。

本书介绍的材料非线性问题、几何非线性问题、接触问题等只是非线性问题的冰山一角，希望能抛砖引玉，读者以此为基础，学习更多的非线性分析知识，结合 ANSYS 强大的非线性分析功能，在实际工程中发挥作用。



第 12 章　锤击法施工仿真分析

ANSYS 除了提供标准的隐式动力学分析模块以外，还提供了显式动力学分析模块——ANSYS/LS－DYNA。该模块主要用于模拟非常大的变形，其中惯性力占支配地位，并考虑所有的非线性行为。对于冲击、碰撞、快速成型等问题，利用其显式方程来求解是目前最有效的方法。

ANSYS/LS－DYNA 将显式有限元程序 LS－DYNA 和 ANSYS 程序强大的前、后处理功能结合起来。利用 LS－DYNA 的显式算法能快速求解瞬时大变形动力学、大变形和多重非线性准静态问题以及复杂的接触碰撞问题。使用本程序，可以用 ANSYS 建立模型，用 LS－DYNA 进行显式求解，然后用标准的 ANSYS 后处理器来观看结果。此外，也可以在 ANSYS 和 ANSYS/LS－DYNA 之间传递几何信息和结果信息以执行连续的隐式－显式/显式－隐式分析，如坠落实验、回弹及其他需要此类分析的应用。

本章学习目标

- 掌握 ANSYS 显式动态分析的基本流程
- 掌握 ANSYS 显式动态分析单元的使用方法
- 掌握 ANSYS 显式动态分析的建模方法
- 掌握 ANSYS 显式动态分析的边界条件类型
- 掌握 ANSYS 显式动态分析的边界施加方法
- 掌握 ANSYS 显式动态分析的求解方法
- 了解 ANSYS 显式动态分析的接触分析方法
- 了解 ANSYS 显式动态分析的材料模型
- 了解 ANSYS 显式动态分析中的刚体
- 掌握 ANSYS 显式动态分析的后处理方法
- 了解 ANSYS 显式动态分析跌落模块

12.1　ANSYS 显式动态分析模块简介

显式动态分析能够模拟真实世界的各种复杂问题，特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题，也可以求解传热、流体及流固耦合问题。进行显式动态分析与常规的隐式分析略有不同，本章将对其进行简要介绍。

12.1.1　显式动态分析的流程

显式动态分析求解过程与 ANSYS 程序中的其他分析过程类似，主要由 3 个步骤组成。

（1）建立模型（用 PREP7 前处理器）。

（2）加载并求解（用 SOLUTION 处理器）。

（3）查看结果（用 POST1 和 POST26 后处理器）。

在显式动态分析中，可以使用与其他 ANSYS 分析相同的命令来建立模型、执行求解。同样，也可以采用 ANSYS 图形用户界面（GUI）中类似的选项来建模和求解。

然而，在显式动态分析中有一些独特的命令，见表 12-1。

表 12-1　LS－DYNA 命令

命　令	功　能
EDADAPT	激活自适应网格
EDASMP	创建部件集合
EDBOUND	定义一个滑移或循环对称界面
EDBVIS	指定体积黏性系数
EDBX	创建接触定义中使用的箱形体
EDCADAPT	指定自适应网格控制
EDCGEN	指定接触参数
EDCLIST	列出接触实体定义
EDCMORE	为给定的接触指定附加接触参数
EDCNSTR	定义各种约束
EDCONTACT	指定接触面控制
EDCPU	指定 CPU 时间限制
EDCRB	合并两个刚体
EDCSC	定义是否使用子循环
EDCTS	定义质量缩放因子
EDCURVE	定义数据曲线
EDDAMP	定义系统阻尼
EDDC	删除或杀死/重激活接触实体定义
EDDRELAX	进行有预荷载几何模型的初始化或显式分析的动力松弛
EDDUMP	指定重启文件的输出频率（d3dump）
EDENERGY	定义能耗控制
EDFPLOT	指定荷载标记绘图
EDHGLS	定义沙漏系数
EDHIST	定义时间历程输出
EDHTIME	定义时间历程输出间隔
EDINT	定义输出积分点的数目
EDIS	定义完全重启动分析的应力初始化
EDIPART	定义刚体惯性
EDLCS	定义局部坐标系
EDLOAD	定义荷载

（续）

命　　令	功　　能
EDMP	定义材料特性
EDNB	定义无反射边界
EDNDTSD	清除噪声数据，提供数据的图形化表示
EDNROT	应用旋转坐标节点约束
EDOPT	定义输出类型，ANSYS 或 LS－DYNA
EDOUT	定义 LS－DYNA ASCII 输出文件
EDPART	创建、更新、列出部件
EDPC	选择、显示接触实体
EDPL	绘制时间荷载曲线
EDPVEL	在部件或部件集合上施加初始速度
EDRC	指定刚体/变形体转换开关控制
EDRD	刚体和变形体之间的相互转换
EDREAD	把 LS－DYNA 的 ASCII 输出文件读入到 POST26 的变量中
EDRI	为变形体转换成刚体时产生的刚体定义惯性特性
EDRST	定义输出 RST 文件的时间间隔
EDSHELL	定义壳单元的计算控制
EDSOLV	把“显式动态分析”作为下一个状态主题
EDSP	定义接触实体的小穿透检查
EDSTART	定义分析状态（新分析或是重启动分析）
EDTERM	定义中断标准
EDTP	按照时间步长大小绘制单元
EDVEL	给节点或节点组元施加初始速度
EDWELD	定义无质量焊点或一般焊点
EDWRITE	将显式动态输入写成 LS－DYNA 输入文件
PARTSEL	选择部件集合
RIMPORT	把一个显式分析得到的初始应力输入到 ANSYS
REXPORT	把一个隐式分析得到的位移输出到 ANSYS/LS－DYNA
UPGEOM	相加以前分析得到的位移，更新几何模型为变形构型

12.1.2 显式动态分析单元

LS－DYNA 单元就是用于进行显式动力学分析的单元。常用的有 LINK160（显式三维杆单元）、BEAM161（显式三维梁单元）、SHELL163（显式结构薄壳）、SOLID164（显式三维结构实体）、PLANE162（显式三维实体）、COMBI165（显式弹簧－阻尼单元）、MASS166（显式三维结构质量）、LINK167（显式承拉杆单元）等。

（1）LINK160 在每个节点上有 3 个自由度传递轴向力。本单元只用于显式动力学分析，如图 12-1所示。

（2）BEAM161（见图12-2）有几个特征：应变采用客观增量应变（刚体旋转不生成应变），可模拟实际应用中存在的大变形；从计算效率和鲁棒性来说都很好；与块单元兼容；包含有限横向剪切应变。然而，用来维持这个应变组元所需增加的计算时间较长。Belytschko－Schwer梁单元方程（KEYOPT（1）=2、4或5）是结构有限元家族的一部分，它用一种“共同旋转技术”来处理大旋转。本单元只用于显式动力学分析。

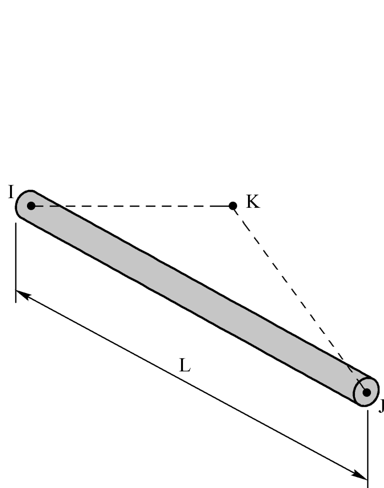


图12-1 LINK160单元示意图

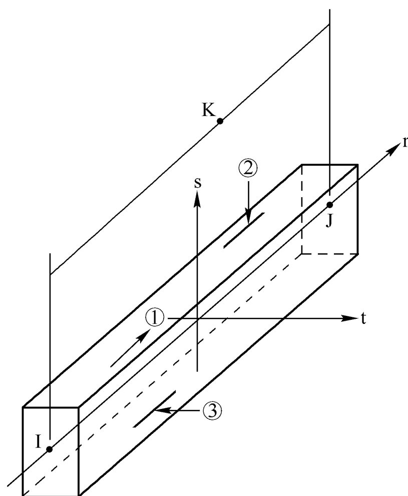


图12-2 BEAM162单元示意图

（3）SHELL163是一个4－节点单元，具有弯曲和膜特征，可施加平面和法向荷载，如图12-3所示。本单元在每个节点上有12个自由度：在节点X、Y和Z方向的平动、加速度、速度和绕X、Y和Z轴的转动。本单元只用于显式动力学分析。

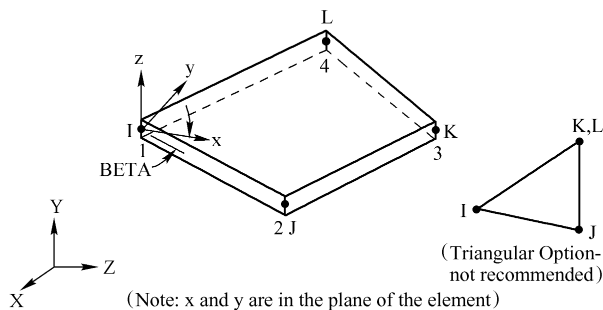


图12-3 SHELL163单元示意图

（4）SOLID164用于三维结构实体建模，几何模型如图12-4所示。该单元由8个节点定义，在每个节点上有下列自由度：在节点X、Y和Z方向的平动、速度、加速度。本单元只用于显式动力学分析。

（5）PLANE162单元是一个二维4节点的实体单元，它既可以用作平面（X－Y平面）单元，也可以用作轴对称单元（Y轴对称）。KEYOPT（3）用来指定单元的平面应力、轴对称和平面应变选项。对于轴对称单元，可以利用KEYOPT（2）指定面积或体积加权选项。PLANE162典型情况下为4节点单元。当然，也可以用3节点三角形选项，但是由于它太僵

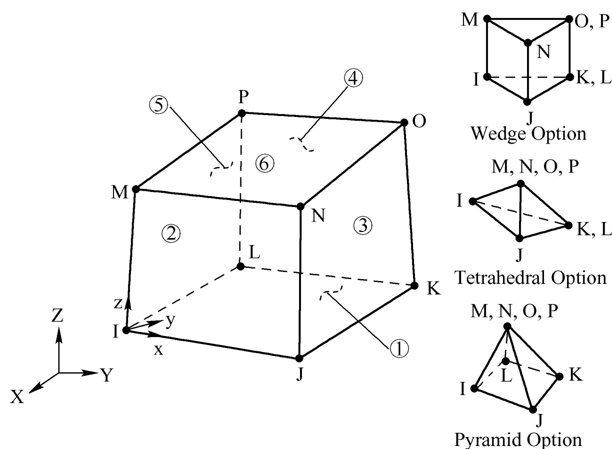


图 12-4　SOLID164 单元示意图

硬，所以不推荐使用。这个单元没有实常数。要注意的是，含有 PLANE162 单元的模型必须仅包含这种单元。ANSYS/LS－DYNA 中不允许有二维和三维单元混合使用的有限元模型。

该单元可用的材料模型与 KEYOPT(3)的设置有关。当 KEYOPT(3)＝0、1 或 2（平面应力、平面应变或轴对称）的，用户可以选择下列材料模型。

- 各向同性弹性。
- 正交各向异性弹性。
- Blatz－ko 橡胶。
- Mooney－Rivlin 橡胶。
- 黏弹性。
- 双线性各向同性。
- 双线性随动强化。
- 塑性随动强化。
- 幂率塑性。
- 应变率相关幂率塑性。
- 应变率相关塑性。
- 分段线性塑性。
- 复合材料破坏。
- Johnson－Cook 塑性。
- Bamman。

对平面应力选项（KEYOPT(3)＝0），可以选择下列材料。

- 3 参数 Barlat 塑性。
- Barlat 各向异性塑性。
- 横向正交各向异性弹塑性。
- 横向正交异性 FLD。

对轴对称和平面应变选项（KEYOPT(3)＝1 或 2），可以选择下列材料。

- 正交各向异性弹性。

- 弹塑性流体动力。
- 闭合多孔泡沫。
- 低密度泡沫。
- 可压缩泡沫。
- Honeycomb 蜂窝材料。
- 空材料。
- Zerilli – Armstrong。
- Steinberg。
- 弹性流体。

（6）COMBI165 是显式弹簧 – 阻尼单元。弹簧单元因位移产生一个力（也就是说，改变单元的长度产生力），力沿单元轴向加载。例如，拉力在节点 1 上是沿轴的正方向，而对节点 2 来说则是沿轴的负方向。默认时，单元轴的方向就是从节点 1 到节点 2。当单元旋转时，力作用方向线也将随之而旋转。

阻尼单元可认为是弹簧单元的一种，可模拟线性黏性和非线性黏性阻尼。

也可使用旋转（扭转）弹簧 – 阻尼单元，这可以通过 KEYOPT（1）来选择，其他输入部分和平移弹簧一样；给定的力 – 位移关系可认为是力矩 – 转角（单位为弧度）关系，力矩施加方向沿单元的轴向方向（顺时针为正）。旋转弹簧单元只影响其节点的旋转自由度——它们并不把节点铰接在一起。

COMBI165 单元可和其他显式单元混合使用。然而，由于它没有质量，在分析中不能只有 COMBI165 一种类型单元。为了表达一个弹簧/质量系统，必须定义 MASS166 单元来加上质量。对于同一个 COMBI165 单元，不能同时定义弹簧 – 阻尼特性。但是，可以分别定义使用同样节点的弹簧 – 阻尼单元（也就是说，可以重叠两个 COMBI165 单元）。对于 COMBI165 单元，可以使用下列材料模型。

- 线弹性弹簧。
- 线粘性阻尼。
- 弹性塑性弹簧。
- 非线性弹性弹簧。
- 非线性黏性阻尼。
- 通用非线性弹簧。
- 麦克斯韦黏弹性弹簧。
- 无弹性拉伸或仅压缩弹簧。

使用 COMBI165 单元时，应该给每一零件分别指定唯一的实常数、单元类型和材料特性（分别通过 R、ET 和 TB 命令来实现），从而保证每个零件都分别定义。

（7）MASS166 质量单元由一个单节点和一个质量值定义。质量单元通常用于模拟一个结构的实际质量特性，而没有把大量实体单元和壳体单元包括进去。例如，在汽车碰撞分析中，质量单元可以模拟发动机部分，主要感兴趣的不是它的变形性质。采用质量单元将减少分析所需的单元数目，因而减少求解所需的计算时间。

（8）LINK167 单元是仅能拉伸的杆，可以用于模拟索。它与弹性单元类似，由用户直接输入力与变形的关系。本单元需要用 EDMP 命令来定义索单元选项。

用户也可用 MASS166 单元来定义一个节点的集中转动惯量。如使用这一选项，可在 MASS166 单元定义中设置 KEYOPT(1) = 1 并且通过单元实常数输入 6 个惯性矩值（IXX、IXY、IXZ、IYY、IYZ、IZZ)。这个选项不能输入质量值，所以必须在同一个节点定义第 2 个质量单元来说明质量（KEYOPT(1) = 0)。

以下几种单元可被定义为刚性体：LINK160、BEAM161、PLANE162、SHELL163、SOLID164和 LINK167。每个实体单元、壳单元和梁单元的质量都平均分配给单元的节点。在壳单元和梁单元中，每个节点还将附加一个转动惯量；只采用一个单值，其作用就是让质量围绕节点呈球形分布。

12.1.3 显式动态分析建模

显式动态分析的第 1 步就是创建模型，使它能够表达进行分析的物理系统。用 PREP7 前处理器来建立模型。

如果通过 GUI 菜单路径进行分析的话，那么事先设置参考选项（Main Menu > Preference）为 LS – DYNA Explicit 是很重要的。这样，菜单就被完全过滤成显式动态的输入选项。值得注意的是，Preference 选项被设置为 LS – DYNA Explicit 并没有激活 LS – DYNA 求解。要做到这一点，就必须定义一个显式单元类型，如 SHELL163。

一旦设置好分析选项 Preference，就可以像通常分析任何问题一样建立模型。

（1）定义单元类型和实常数。

（2）定义材料模型。

（3）定义几何模型。

（4）划分网格。

（5）定义接触表面。

1. 定义单元类型和实常数

一旦选择好能代表物理系统的单元类型，就可以用 ET 命令来定义单元类型（GUI：Main Menu > Preprocessor > Element Type)，用 R 命令来定义实常数（GUI：Main Menu > Preprocessor > Real constants)。

2. 定义材料模型

在显式动态分析中有很多可用的材料类型，具体参见《ANSYS Element Reference》，以确定特定的单元类型所用的材料模型。一旦确定了所用的材料模型，就可以定义所有相关的特性。如果通过批处理或命令流来定义，可以使用 MP、TB 和 TBDATA 命令（某些情况下，可用 EDMP 命令)。在 GUI 界面中，材料模型通过菜单路径 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 来定义。

在选择了合适的材料模型之后，就可以定义模型所需的特性。

定义和整体坐标不一致的各向正交异性模型，必须先用 EDLCS 命令定义局部坐标系（GUI：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Local CS > Create Local CS)。

对于一些材料模型，还需用 EDCURVE（GUI：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Curve Options）命令定义与材料相关的数据曲线（如应力 – 应变曲线)。

3. 定义几何模型

建立几何模型的最简单方法就是采用 ANSYS 程序中的实体建模功能。对于简单模型

(例如，仅线单元)，可以使用直接建模法。用这种方法，可以直接定义模型的节点和单元。详细信息参见第 2 章。

4. 划分网格

建立实体模型后，就可以用节点和单元对其进行网格划分。第 4 章详细描述了划分网格的步骤。如果对 ANSYS 的网格划分不太熟悉，在划分显式动态模型之前应该先阅读该章内容。由于该章已详细讨论过了，在此只讨论以下几点。

- 定义单元属性。
- 定义网格划分控制。
- 生成网格。

定义单元属性，就是要事先指定单元类型、实常数和材料特性来用于下一步的网格划分。使用 TYPE、REAL、MAT 命令或通过如下菜单路径来完成。

- Main Menu > Preprocessor > Attributes > Define > Default Attribs。
- Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes。

网格控制就是指定划分网格时单元的大小和形状。在 ANSYS 程序中有多种控制方法，在 GUI 中菜单路径为 Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool。

在选择网格控制时要注意以下几点。

- 尽量避免退化的实体和壳体单元（例如三角形壳体和四面体实体），相对于四边形和六面体来说它们太刚硬，并且精度不高。
- 单元的大小尽量均匀（例如避免产生相对较小的单元面积），单元大小差别很大可能会导致很小的时间步长、较长的运行时间。如果划分特殊的几何模型需要相对较小的单元，那么可以用质量比例来增大最小时间步长。
- 尽量不要使用 SmartSizing 方法进行单元控制（SMARTSIZE 命令），因为它可能在网格中单元的大小上产生很大的差别。应使用 ESIZE 和相关的命令来控制单元大小。
- 尽量避免可能产生沙漏的坏单元形状。
- 当使用降阶单元算法或者单元可能遭受沙漏变形时，不要使用粗网格划分，
- 如果有沙漏现象的话，尽量在部分模型或整个模型中使用全积分单元。

给定网格控制后，就可以用相应的命令（如 AMESH、VMESH ）或通过 GUI 菜单路径 Main Menu > Preprocessor > Meshing，Mesh（或上面提到的 Mesh Tool）进行网格划分。

5. 定义接触面

显式动态分析常常涉及到表面之间的接触。定义接触包括 4 个步骤：

（1）定义能很好地表达物理模型的接触类型（EDCGEN 命令）。

（2）定义接触表面（CM、EDPART、EDASMP 和 EDCGEN 命令）。

（3）定义摩擦系数参数（EDCGEN）。

（4）为选定的接触类型定义附加数据（EDCGEN 和 EDCONTACT）。

如果不使用自动接触，那么可以用 CM 命令把表面上的节点组成为一个 COMPONENT 来定义接触面。一旦生成了 COMPONENT，就可以用 EDCGEN 命令来定义所需表面间的接触（如节点部件）。也可以用 EDCGEN 命令来定义接触类型。对于单面接触算法，ANSYS/LS－DYNA 定义接触体的外表面。

注意：接触表面也可以用 PART 号或一个部件集合来识别（用 EDASMP 而不用节点部件）。

EDCGEN 命令还可以用来指定摩擦系数参数以及与不同接触类型相对应的输入参数。另一个命令 EDCONTACT（GUI：Main Menu > Preprocessor > LS – DYNA Options > Contact）可以定义多种接触控制，例如接触穿透检测和滑移表面罚函数等。



6. 建模的一般准则

当创建显式动态模型时，应考虑下述基本准则。

- 在模型中使用刚体来代表相对刚硬、没有屈服的部分。使用刚体可以简化求解，缩短求解时间。
- 对材料性能使用一些符合实际的值。例如，不要用很高的、不切实际的弹性模量来表达刚性体，对于壳单元不要使用不切实际的厚度值。
- 考虑使用阻尼（EDDAMP 命令）以消除结构响应中的不真实的振荡。
- 如果已经用常规 ANSYS 程序进行了二维的动态分析，应考虑把模型扩展为三维模型，并用 ANSYS/LS – DYNA 进行分析，以便在较短的时间内得到更精确的结果。

注意：ANSYS 程序中的子模型和超单元特性不能在 ANSYS/LS – DYNA 中使用。

7. PART 的定义

具有相同单元类型、实常数和材料号的一组单元被指定为一个 PART 并给定一个 PART 号。有许多 ANSYS/LS – DYNA 命令和 PART 号有关，如 EDCGEN、EDDC、EDLOAD、EDDAMP、EDCRB 和 EDREAD 等。在 ANSYS/LS – DYAN 程序对模型进行求解时，将自动生成 PART 号并写入 LS – DYNA 输入文件 Jobname. K。它可以用 EDPART 命令建立、更新、列表表示。

从顺序编排所选单元建立 PART 号。如果在单元编排中改变单元类型、实常数和材料号中的任何一个，将给那组单元定义下一个 PART 号。例如，前 10 个单元有单元类型 1、实常数 2、材料号 3，那么这 10 个单元将给定 PART 号为 1。如果下面 100 个单元有单元类型 1、实常数 1、材料号 2，那么这些单元将给定 PART 号为 2，以此类推。

通过 EDPART 命令中的 CREATE/UPDATE/LIST 选项可以创建、更新、列出 PART 表。如果执行 SOLVE 命令或执行带 ANSYS/LSDYNA/BOTH 选项的 EDWRITE 命令，则 PART 表将被建立并永久保存。如果 PART 表已经存在，则以后的命令只能修改这个表而不能覆盖它。

EDPART,CREATE 可以创建新的 PART 号。可以用 EDPART,LIST 命令列表表示这些 PART。这个表显示了在建立或修改时 PART 的状态（EDPART,CREATE）。如果重复使用 EDPART,CREATE 命令，则 PART 表被覆盖。为了得到在修改或增加模型后的实际 PART 表，执行 EDPART,UPDATE 命令。它可以扩展已经存在的 PART 表而不用改变其顺序，并且可以向已经存在的由相同的单元类型、实常数和材料号构成的部件中增加单元。单元类型、实常数和材料号相同的任何 PART 未被任何所选单元参考时，则该 PART 不可用。很明显，它将在 PART 表的第 5 列上为零值。如果预先定义的 PART 相关命令与一个无用的 PART 有关，那么执行 SOLVE 命令或 EDWRITE,ANSYS /LSDYNA /BOTH 命令时将有一个警告。

8. 自适应网格划分

在金属成型和高速撞击分析中，物体要经历很大的塑性变形。单积分点显式单元，常用于大变形。但是在这种情况下，由于单元纵横比不合适，可能给出不精确的结果。为了解决

这一问题，ANSYS/LS-DYNA 程序可以在分析过程中自动重新划分表面来改善求解精度。这一功能，即自适应网格划分，由 EDADAPT 和 EDCADAPT 命令控制。

EDADAPT 命令用于在一个指定的 PART 内激活自适应网格划分功能（用 EDPART 命令创建或显示有效 PART IDs）。例如，为了给 PART1 打开自适应网格划分功能，可以执行下列命令。

```
EDADAPT,1,ON
```

注意： 自适应网格划分功能仅对包含 SHELL163 单元的部件有效。

当此项功能打开时，分析中该部件的网格将自动重新生成，从而保证在整个变形过程中有合适的单元纵横比。自适应网格划分一般应用在大变形分析（如金属变形）中（调节网格最典型的应用是板料）。在一个模型中要在多个部件上应用此功能，必须对每个不同的 PART ID 执行 EDADAPT 命令。默认时，该功能是关闭的。

在指定哪些部件重新划分后，必须用 EDCADAPT 命令定义网格划分参数。采用 EDADAPT 命令定义需要划分网格的所有 PART ID 号，用 EDCADAPT 命令对其设置控制选项。

EDCADAPT 命令控制的参数简介如下。

- Frequency（FREQ）：调节自适应网格划分的时间间隔。例如，假设 FREQ 设置为 0.01，如果单元变形超过指定的角度容差，则它将每隔 0.01 s 被重新划分一次（假设时间单位为秒）。因为 FREQ 的默认值为 0.0，所以在分析中应用自适应网格划分时必须指定此项。
- Angle Tolerance（TOL）：对于自适应网格划分（默认值为 1e31），有一个自适应角度公差。TOL 域控制着单元间的纵横比，它对保证结果的精度是非常重要的，如果单元之间的相对角度超过了指定的 TOL 值，单元将会被重新划分。
- Adaptivity Option（OPT）：对于自适应网格划分，有两个不同的选项。OPT = 1 时，和指定的 TOL 值相比较的角度变化只是根据初始网格形状计算的；OPT = 2 时，和指定的 TOL 值相比较的角度变化是根据前一次重新划分的网格计算的。
- Mesh Refinement Levels（MAXLVL）：MAXLVL 域控制着整个分析中单元重新划分的次数。对于一个初始单元，MAXLVL = 1 可以创建一个附加单元，MAXLVL = 2 允许增加到 4 个单元，MAXLVL = 3 允许增加到 16 个单元。较高的 MAXLVL 会得到更精确的结果，但也会明显增加模型规模。
- Remeshing Birth and Death Times（BTIME and DTIME）：自适应网格划分的生死时间控制着该功能在分析过程中的激活或关闭。例如，如果设置 BTIME = 0.01 和 DTIME = 0.1，那么分析中只在 0.01 和 0.1 秒间进行重新网格划分（假设时间单位为秒）。
- Interval of Remeshing Curve（LCID）：数据曲线把重新划分网格的时间间隔定义为时间的函数。数据曲线的横坐标为时间，而纵坐标为变化的时间间隔。如果这个选项不为 0，那么它将代替适应频率（FREQ）。但是要注意，开始第一个自适应性循环仍需要非零 FREQ 值。
- Minimum Element Size（ADPSIZE）：根据单元边长设定的最小单元尺寸。如果不定义此参数，边长的限制将被忽略。

- Oneor Two Pass Option（ADPASS）：如果 ADPASS = 0，将使用双通道自适应划分，在重新划分网格后将重复这一计算（默认值）。如果 ADPASS = 1，则使用单通道自适应划分，而计算不再重复。
- Uniform Refinement Level Flag（IREFLG）：值为1、2、3 等，分别允许4、16、64 等划分等级。对于每个初始单元，都分别生成统一的单元。
- Penetration FLAG（ADPENE）：根据 ADPENE 是正（到达）的还是负（穿透）的，当接触表面到达或穿透工具表面时，程序将依据这个值调整网格。自适应细化主要依据加工曲线。如果 ADPENE 是正的，细化一般发生在接触之前，因此可能用单通道划分就可以了（ADPASS = 1）。
- Shell Thickness Level（ADPTH）：绝对薄壳厚度标准，低于该值时自适应网格划分开始。这个选项仅在自适应角度公差不为零的情况下有效。如果期望不改变角度，激活基于厚度的自适应重新划分功能，那么可把 TOL 设为较大的角度（如果 ADPTH = 0.0，不使用这个选项）。
- Maximum Element Limit（MAXEL）：自适应网格划分结束的最大单元数。如果超过了此值，自适应网格划分将被中止。

对于大多数问题，不应该使用自适应网格划分进行初始分析。如果分析结果出现扭曲的网格，或结果不正确，那么再应用此项重新进行分析。当 LS－DYNA 分析中因为 Negative Volume Element 的错误终止时，也可用此项分析。

当打开自适应网格划分功能时，在求解过程中模型内的单元数将发生变化。在一个调节循环结束后，网格将被更新，并且生成一个扩展名为 RSnn 的新结果文件（这里 nn 为自适应网格标准。在由 FREQ 指定的每个时间增量或 LCID 指定的时间间隔，都会发生自适应循环）。例如，重新划分两次网格的模型将产生两个结果文件，即 Johname.RS01 和 Johname.RS02。

注意：即使每次循环网格不发生变化，也会产生一个新的结果文件。

每次循环都会产生一个扩展名为 HInn 的时间历程文件，尽管这些文件可能不如 RSnn 文件有用。此外，LS－DYNA 还创建了一系列源文件名为“adapt”的文件。因此，在激活调节网格划分时，不要把“adapt”作为项目名。

12.1.4 显式动态分析的加载

当模型建好后，下一步就是给结构施加荷载，为求解做准备。为了能正确地模拟结构的响应，就必须定义与指定时间间隔相对应的荷载。

1. 一般荷载选项

与许多隐式分析不同的是，显式分析中的所有荷载必须与时间有关。因此，在 ANSYS/LS－DYNA 中，许多标准的 ANSYS 命令都是无效的。在 ANSYS/LS－DYNA 中，尤其不能使用 F、SF、BF 系列命令，因为它们只能定义与时间无关的荷载。此外，D 命令只能定义节点约束。基于上述原因，在 ANSYS/LS－DYNA 中用一对数组参数定义荷载（一个用来设置时间，另一个设置荷载）。

注意：虽然节点加速度（Ax，Ay，Az）和节点速度（Vx，Vy，Vz）以自由度的形式出现，但它们不是物理自由度，不能使用 D 命令约束。要采用 EDLOAD 命令给这些节点施加荷载。

在 ANSYS/LS－DYNA 中，所有荷载都是在一个荷载步内施加的。这和隐式分析有很大的不同，隐式分析是在多个荷载步内施加荷载。在 ANSYS/LS－DYNA 中，对于一些特定的荷载，也可以用 EDLOAD 命令指定何时施加（Birth Time）、何时去除（Death Time）。参考 EDLOAD 命令中的 Birth Time，Death Time 和 CID，检验 Birth/Death Time 的适用性。

给模型施加荷载，需遵循以下步骤。

（1）把模型中受载的那部分定义成 Component（或 PART，用于刚体）。

（2）定义包含时间间隔和荷载数值的数组参数。

（3）定义荷载曲线。

（4）如果不是在全局坐标系中加载，需要用 EDLCS 命令定义荷载方向。

（5）模型加载。

（1）组元。

除了给刚体加载外，显式分析中所有荷载都施加到 Component 上。因此，第 1 步就是把模型中受载的那部分组合成 Component。每个 Component 应由模型中承受同样荷载的部分组成，并且可以通过材料本构、模型中位置、预期状态等联系在一起。

例如，想要分析一个棒球撞击到墙上的结果，可以定义球上的节点为一个 Component，球棒上的节点为另一个 Component，墙上的节点为第 3 个 Component。

可以定义任意多个 Component，然后给每一个 Component 加载。Component 必须由节点或单元组成（只有当施加压力荷载时，Component 才由单元组成）。定义 Component 时，首先要选择 Component 中想要包含的部分，然后在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Comp /Assembly > Create Component 命令来定义 Component（CM）。

对于刚体，荷载一般都施加到 PART 号上，而不是 Component 上。这是因为，当使用命令 EDMP、RIGID、MAT 定义刚体时，已经包含一系列节点和单元。

（2）数组参数。

值得注意的是，在显式动态分析中，荷载在一些特定时间间隔内施加到结构上，这样就可以观察在特定时间段里施加荷载后模型的瞬态行为。因此，不仅需要定义施加荷载的类型（FX，FY，FZ，ROTX，ROTY，ROTZ 等），也需要定义荷载施加到结构上的时间间隔值。

时间间隔值和其相对应的荷载值组合在一起，定义为数组参数。这些参数必须定义为两部分，第 1 部分为时间间隔值，第 2 部分为荷载值，荷载应与时间间隔相对应。在 GUI 中，通过菜单路径 Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit 来定义一个数组参数。

注意：可以通过线性插值得到中间时间点的荷载值。指定时间范围外的荷载值不能由程序插入。因此，必须保证荷载时间范围至少等于求解时间；否则，由于过早地去除荷载，求解结束时的结果将会变为无效值。

（3）施加荷载。

一旦定义了能代表荷载的数组参数，这些荷载与时间有关，就可以直接用 EDLOAD 命令输入参数定义荷载，或者使用 EDCURVE 命令输入参数来定义荷载曲线，相应的荷载曲线 ID 可用 EDLOAD 命令输入。

一旦定义好 Component 和数组参数，就可以使用 EDLOAD 命令给建立的模型加载。在 GUI 中，可以通过菜单路径 Main Menu > Solution > Loading Options > Specify Loads 来加载。

可以选择增加荷载（EDLOAD 中 ADD 标记），如力、力矩、节点加速度、表面压力等。所有的荷载都用 EDLOAD 命令施加到全局笛卡儿坐标系上。此为其默认设置。

在 GUI 界面的对话框中将列出所有有效荷载，以及预先定义好的 Component 和数组参数。只需简单地选择所需的荷载标记，以及 Component（刚体的 PART 号）和数组参数集合（预先定义的荷载曲线号）。值得注意的是，并不是所有的荷载标记都适用于所有 Component 或 PART 号。

① 以下的荷载标记只适用于节点 Component。

- 力：FX，FY，FZ。
- 力矩：MX，MY，MZ。
- 位移：UX，UY，UZ。
- 转角：ROTX，ROTY，ROTZ。
- 速度：VX，VY，VZ。
- 节点加速度：AX，AY，AZ。
- 体加速度：ACLX，ACLY，ACLZ。
- 角速度：OMGX，OMGY，OMGZ。
- 温度：TEMP。

注意：虽然 V（X，Y，Z）和 A（X，Y，Z）作为 DOFs 出现，但它们实际上并不是物理 DOFs。这些量是按 DOF（自由度）量求解和存储的，并用于后处理。

② 以下的荷载标记只适用于刚体（部件号）。

- 力：RBFX，RBFY，RBFZ。
- 力矩：RBMX，RBMY，RBMZ。
- 位移：RBUX，RBUY，RBUZ。
- 转角：RBRX，RBRY，RBRZ。
- 速度：RBVX，RBVY，RBVZ。
- 角速度：RBOX，RBOY，RBOZ。

③ 以下荷载标记只适用于单元 Component。

压力：PRESS。

除了施加荷载外，也可以用 EDLOAD，LIST 和 EDLOAD，DELE 来显示和删除荷载。此外，使用 EDFPLOT 命令可以显示单元上的荷载标记，使用 EDPL 命令可以绘制荷载曲线。

（4）数据曲线

用 EDCURVE 命令定义的数据曲线广泛应用于 ANSYS/LS－DYNA 中。该命令可以用来定义与显式动态材料模型有关的材料数据曲线（如应力－应变）、荷载数据曲线（如力－偏转）。此外，它还可以定义时间荷载曲线（力、位移、速度等）。这些荷载曲线可以用 ED-LOAD 命令输入。

某些材料模型（例如，TB，PLAW 或 TB，HONEY）要求指定材料特性数据（可能是有效应变速率、塑性应变或体积应变的函数）。对于这些数据，在用 TBDATA 命令定义材料特性之前，需用 EDCURVE 命令定义特性曲线。在刚体和压延筋接触问题中，也采用数据曲线来定义变形特性。

与对 Component 进行加载类似，数据曲线组合成数组参数，然后与特定的曲线参考号相

联系。这个参考号可用于指定的材料模型（PLAW、HONEY 等）、接触类型（RNTR、ROTR）和压延筋。

定义数据曲线可以分为以下几个步骤：

① 定义一个包含材料特性或摩擦力横坐标值的数组参数（例如有效塑性应变、有效应变率、位移等）。

② 定义第 2 个数组参数，包含材料特性或摩擦力的纵坐标值（例如初始屈服应力、弹性模量、力等）。

③ 定义数据曲线（EDCURVE）。定义这些参数后，在 GUI 中通过下列路径定义数据曲线。

- Main Menu > Preprocessor > Material Props > Curve Options。
- Main Menu > Solution > Loading Props > Curve Options。

选择一个数据曲线 ID 号，产生 TBDATA 时将采用这个数据曲线 ID 号来将这些数据与特定的材料特性相联系。可以用 EDCURVE,LIST 显示数据曲线，用 EDCURVE,PLOT 绘制曲线，用 EDCURVE，DELETE 删除曲线。

2. 约束和初始条件

在开始求解之前，需要给模型施加约束。另外，还可能给运动物体设定初始速度。

（1）约束。

与 ANSYS（隐式）不同，ANSYS/LS－DYNA 区分零约束与非零约束。非零约束如荷载那样处理（伴随着荷载曲线，参见前面的讨论）。仅零约束才能使用 D 命令；也就是说，给定的值必须总是零，其他值无效。D 命令仅用于固定模型的某些部分。可以用零约束来实现对称/反对称边界条件。

用户可以用 EDNROT 命令在旋转节点坐标系中施加零荷载，但首先需用 EDLCS 命令定义局部坐标系。

当模拟几何体的小对称部分时，需定义滑移或循环对称。可以使用 EDBOUND 命令来定义滑移或循环对称的对称边界面。可以用节点组元确定边界或方向矢量来定义法向（滑移对称）或旋转轴（循环对称）。

在 ANSYS/LS－DYNA 中，可以用 EDCNSTR 命令模拟其他类型的约束。可用的约束类型有附加节点设置（ENS）、节点刚体（NRB）、薄壳到实体边界（STS），以及铆接（RIVET）。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Constraints > Apply > Additional Nodal 命令，可以施加这些约束。

- 附加节点设置约束类型（EDCNSTR,ADD,ENS）允许在一个已经存在的刚体上增加节点（通过节点组元），这个刚体是用 EDMP 命令定义的。该节点组元不能和其他任何刚体连接在一起。在刚体上附加的节点可以放置在模型的任何地方，并且可放置在初始刚体外。ENS 选项有许多应用，包括在两个刚体结合的地方设置节点、定义施加荷载的节点，以及在指定的位置定义集中质量。
- 不像用 EDMP 命令定义的典型刚体一样，用 EDCNSTR,ADD,NRB 命令定义的节点刚体不是和一个部件号相联系，而是与一个节点组元有关。当模拟刚性连接时（焊接），NRB 选项是非常有用的。对于一个刚性连接，不同柔性组元（有不同的 MAT IDs）的部分作用在一起形成一个刚体。所以说，很难用一个单一的 MAT ID（和相应

的部件号）来定义这种类型的刚体。但是，用一个节点刚体很容易定义刚性连接。因为节点刚体不是和一个部件号相联系，所以使用刚体（例如用 EDLOAD 命令施加的荷载）的其他选项不能用于节点刚体。

- 薄壳到实体边界选项（EDCNSTR，ADD，STS）把实体单元区域和薄壳单元区域固连起来。如图 12-5 所示，可将一个单独壳节点固连到最多 9 个实体节点上，这些实体节点定义一个 fiber 矢量。定义“fiber”矢量的实体单元节点在整个分析中保持线性，但是在 fiber 方向上保持相对移动。薄壳节点必须和某个沿 fiber 方向的实体单元节点位置重合。

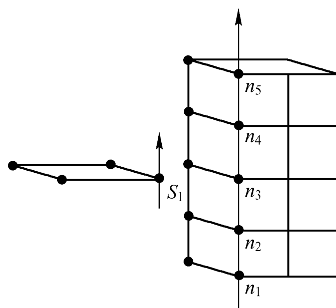


图 12-5　约束薄壳到实体边界

- 与用 EDWELD 命令定义的焊接点相似，RIVET（EDCNSTR，ADD，RIVET）选项在两个不同位置的节点间定义了一个无质量刚性约束。和焊接点不同的是，一个 rivet 不能定义破坏。当定义了一个 rivet 时，节点间的距离将在模拟中的任何运动中保持不变。由 rivet 连接的节点不能是模型中其他约束的一部分。

（2）焊接

在显式动态分析中，模拟被焊接在一起的组元是很普遍的，在部件通常是通过焊接装配在一起的汽车应用中更是极为常见。这种情况下，在 ANSYS/LS－DYNA 中使用 EDWELD 命令来模拟焊接约束。可以模拟两种不同类型的焊接：无质量焊接和一般焊接。用EDWELD命令连接的节点不能用其他方式约束。

对于一个无质量焊接，必须指定两个不同位置的节点。也可以用 EDWELD 命令输入失效参数在焊点内定义失效。失效依据下列关系：

$$\left(\frac{|f_x|}{S_x}\right)^{\exp x}+\left(\frac{|f_s|}{S_s}\right)^{\exp s}\geqslant 1$$

在 GUI 中，通过菜单路径 Main Menu > Preprocessor > LS－DYNA Options > Spot Weld > Massless Spotwld 来定义一个无质量焊点。

一般焊接用于模拟两个部件的长焊接截面。对于一般焊接，必须指定一个有效的节点组元。可以使用重合节点；但是如果使用了重合节点，就必须定义输出数据所用的局部坐标系。一般焊接内的失效也可以用 EDWELD 命令的失效参数来定义，使用与上述相同的关系式。

在 GUI 中，通过菜单路径 Main Menu > Preprocessor > LS－DYNA Options > Spot Weld > Genrlizd Spotwld 来定义一般焊接。

（3）初始速度

在瞬动态模拟中，经常需要定义初始条件。在 ANSYS/LS－DYNA 中，可以用 EDVEL 和 EDPVEL 命令定义初始速度。可以使用这些命令对各种实体施加线速度和角速度。用 EDVEL对节点组元或单个节点施加速度；用 EDPVEL 给部件或部件集合施加速度。

EDVEL 和 EDPVEL 提供了两种定义角速度的方法：Option = VGEN 和 Option = VELO。VGEN 方法围绕指定轴对一个实体（节点组元，部件等）施加刚体旋转；VELO 法直接给每个节点的自由度施加角速度。因为只有壳和梁单元有旋转自由度，VELO 法的角度输入只适

用于 SHELL163 和 BEAM161 单元。对于 VGEN 和 VELO 方法，瞬态速度可以相对于全局笛卡尔坐标系来定义。

注意：*为了模拟旋转体，不管是否用位移，都应该采用 Option = VGEN，因为此方法施加了刚体旋转。*

由于 LS – DYNA 的结构体系，定义初速度的两种方法 Option = VGEN 和 Option = VELO 不能在同一个分析中使用。

定义初速度的步骤如下：

① 定义想要施加初速度的实体。它可以是单个节点、一个节点组元（CM）、一个部件（EDPART）或一个部件集合（EDASMP）。

② 确定 VGEN 和 VELO 是否适合你的应用。

③ 在 GUI 中通过下列菜单路径之一定义初始速度（EDVEL、EDPVEL）：

- Main Menu > Solution > Initial Velocity > – On Nodes – w/Nodal Rotate（VELO 选项）。
- Main Menu > Solution > Initial Velocity > – On Nodes – w/Axial Rotate（VGEN 选项）。
- Main Menu > Solution > Initial Velocity > – On Parts – w/Nodal Rotate（VELO 选项）。
- Main Menu > Solution > Initial Velocity > – On Parts – w/Axial Rotate（VGEN 选项）。

对于 VGEN 和 VELO 选项，相对于全局坐标系输入平动速度（EDVEL 或 EDPVEL 命令的 VX、VY 和 VZ 域）。对于 VELO 选项，在笛卡儿坐标系中输入节点角速度（OMEGAX，OMEGAY 和 OMEGAZ 域）；对于 VGEN 选项，输入角速度的数量级（OMEGAX）、旋转坐标轴（XC，YC，和 ZC 域）以及相对于整体 X、Y、Z 轴的方向角。

如果没有用 EDVEL 或 EDPVEL 命令指定初始速度，则所有的初始速度为零。同样，如果仅指定 EDVEL（例如，EDVEL,VGEN,Cname）命令的 Cname 域或 EDPVEL（EDPVEL,VGEN,PID）的 PID 域，由于这两个命令的其他域默认值为零，所以此时施加的初始速度为零。

若想改变事先用 EDVEL 命令指定的初始速度，用相同的组元名称或节点号重新定义一个新的速度就可以了。这个新值将覆盖原来的组元或节点值。为了显示或删除事先加在节点或节点组元的初始速度，使用 EDVEL,LIST 和 EDVEL,DELE 命令（GUI 菜单路径：Main Menu > Solution > Initial Velocity > – On Nodes – List；Main Menu > Solution > Initial Velocity > – On Nodes – Delete）。

类似的，若想改变事先用 EDPVEL 命令指定的初始速度，可以用相同的部件或部件集合 ID 来重新定义一个新速度。这个新值将覆盖原来的部件或部件集合的速度。为了显示或删除事先加在部件或部件集合上的初始速度，使用 EDPVEL；LIST 和 EDPVEL；DELE 命令（GUI 菜单路径：Main Menu > Solution > Initial Velocity > – On Parts – List；Main Menu > Solution > Initial Velocity > – On Parts – Delete）。

3. 耦合与约束方程

CP 系列命令（CP,CPDELE,CPINTF,CPLGEN,CPLIST,CPNGEN,CPSGEN）可用来在一个结构的不同自由度（DOFS）间进行定义、修改、删除、列表和产生耦合。同样，CE 系列命令（CE,CEDELE,CEINTF,CELIST,CERIG）可在一个结构的不同 DOF 间定义、修改、删除、列出约束方程。在 ANSYS/LS – DYNA 的显式动态程序中，CP 和 CE 命令仅用于 UX，UY 和 UZ DOFs（不允许旋转 DOFs）。

既然旋转 DOFs（UX,UY,UZ）不能使用，那么在显式分析中就不能用 CP 系列命令来模拟涉及旋转的刚体行为。如果使用了 CP 命令，将会导致非物理响应。

同时也要注意到，包含非重合节点，或包含不沿耦合自由度方向节点的耦合设置不会产生力矩约束。这就意味着如果结构旋转，耦合的节点也会旋转。只有作用力和反作用力在模型中满足力矩平衡。对于耦合约束的每个节点，力矩结果与节点到固定中心的距离有关，位移方向与结果力矩有关。在某些情况下这可能导致非物理响应。

4. 非反射边界

当模拟地理力学系统时，常常用一个有限域来表示地面或其他大的实体。对于这种分析，可以在模型外部使用非反射边界限制模型的整体尺寸。可以在以 SOLID164 单元模拟的有限域的表面上应用这些边界。非反射边界将防止在边界产生的人工应力波反射重新进入模型，从而破坏结果。

当模型中包含非反射边界时，LS－DYNA 会根据线性材料行为假设计算所有边界部分的阻抗匹配函数。因此，需进行有限元网格划分，以便使所有重要的非线性行为都包含在离散模型中。

要定义非反射边界，需选择沿 SOLID164 实体外表面（NSEL）组成所需边界的节点，然后定义一个节点组元（CM），用 EDNB 命令在这些节点组元上施加非反射边界，最后激活膨胀和剪切选项。可用 EDNB,LIST 和 EDNB,DELE 来显示或删除定义的非反射边界。

5. 温度荷载

在显式动态分析中，为了应用与温度有关的材料，或包括热应力的影响，可能需要定义温度荷载。温度荷载主要应用在 PLANE162、SHELL163 和 SOLID164 单元中。ANSYS/LS－DYNA 程序提供了几种温度载荷：

- 应用于节点组元的随时间变化的温度（EDLOAD）。
- 应用于模型中所有节点的常温度（TUNIF/BFUNIF）。
- 在顺序显式动态分析中，施加非均匀温度载荷（不随时间变化）的 ANSYS 热分析结果（LDREAD，要求顺序求解）。

第 1 种方法用 EDLOAD,TEMP 命令和一般的加载方法对给定的节点组元施加随时间变化的温度，但必须定义两个数组参数表示荷载——第 1 个包括时间值，第 2 个包括温度值。可以用这些参数定义曲线或用 EDLOAD 命令直接输入。也可以用 EDLOAD 的 SCALE 参数来对这些温度值进行缩放。

第 2 种方法允许给模型中所有节点施加均匀不变的温度。这种方法主要用于模拟稳态热荷载的结构。也可以用 TUNIF 命令或 BFUNIF,TEMP 命令施加这种温度载荷。

第 3 种方法允许把 ANSYS 热分析中计算的温度作为荷载施加到显式动态分析中。这种方法对模拟与温度有关的现象是很有用的，比如锻造。使用这种方法，必须执行隐显顺序求解。在显式阶段，可以用 LDREAD 命令从热分析（隐）结果文件（Jobname. RTH）中读入温度数据，然后加到模型的节点上。在热分析中只能从指定的时间点转移这些温度。

对于这 3 种温度加载方法，可以用 TREF 命令输入参考温度。热荷载定义为施加温度和参考温度的差值。如果不定义参考温度，其默认值为零。

为了使温度荷载有效，必须使用温度相关双线性各向同性材料模型。忽略屈服强度和切向模量，可以用这个模型代表热弹性材料。

注意：温度加载的 EDLOAD 方法不能和 LDREAD 或 TUNIF/BFUNIF 方法混合使用。另外，EDLOAD 命令不能显示或删除 LDREAD、TUNIF 或 BFUNIF 施加的温度荷载。

在一个显式动态分析中可以同时使用 LDREAD 和 TUNIF（或 BFUNIF）。LDREAD 命令把温度荷载施加到所选的节点上，覆盖了 TUNIF 或 BFUNIF 定义的任何温度荷载。LDREAD 没有选择的节点将采用 TUNIF 或 BFUNIF 命令定义的温度荷载。可用 BFDELE 命令删除 LDREAD 定义的温度荷载，用 BFLIST 命令显示其定义的荷载。

6. 动力松弛

为进行隐式－显式连续求解，已将动力松弛功能加入到 ANSYS/LS－DYNA 程序（EDDRELAX命令）。真实的动力松弛（EDDRELAX,DYNA）是通过增加阻尼使动能降为零，从而允许显式求解器进行静态分析。当隐式求解器用于提供预荷载时（EDDRELAX,ANSYS），可采用稍有不同的方法，基于预加载的几何构型（也就是由隐式求解得到的节点位移）进行应力初始化。在后一种情况中，显式求解器仅用 101 个时间步来施加预荷载；而在前一种情况，求解器每 250 个循环步（默认值）就检查动能直到预荷载动能耗散完毕。ANSYS/LS－DYNA 支持两种方法，它在零时间瞬态分析部分开始前，在虚拟时间内进行。EDLOAD 命令通过 PHASE 标记指定分析类型。

```
EDLOAD,ADD,Lab,,Cname,Par1,Par2,PHASE
```

PHASE 分别介绍如下。

- 0：荷载曲线仅用于瞬态分析（默认值），或隐式－显式连续求解。
- 1：荷载曲线仅用于动力松弛。
- 2：荷载曲线仅用于瞬态分析和动力松弛。

与 ANSYS/LS－DYNA 的动力松弛有关的分析类型主要有 5 种，下面分别介绍。

- 仅瞬态动力分析（EDDRELAX，OFF）：在这种情况下，EDLOAD 命令的 PHASE 参数设置为 0。不采用动力松弛，这是默认设置。
- 仅应力初始化而没有瞬态分析（EDDRELAX,DYNA）：在这种情况下，用 ANSYS/LS－DYNA 显式求解器近似求解静力分析，实际最好由隐式求解器（如 ANSYS）来处理。在 EDLOAD 命令中，PHASE 参数设置为 1，终止时间（TIME 命令）必须设置为 0，以预防静荷载的卸载。采用实际的动力松弛。
- 无荷载瞬态分析的应力初始化（EDDRELAX,DYNA）：这种情况与前一种情况相同，不同的是时间设置为所期望的值。在零时间时，结构立即卸载，自由振动。
- 有加载瞬态分析的应力初始化（EDDRELAX,DYNA）：类似于前一种情况，不同的是用 EDLOAD 命令（借助于 PHASE＝2）在虚拟时间进行动力松弛以获得预加载并在真实时间进行瞬态分析。如果用倾斜荷载曲线代替恒定荷载曲线，则结构在零时间时卸载并重新加载。因此，如果显式求解器需要一个倾斜荷载曲线对静态求解精确收敛，那么最好使用两个 EDLOAD 命令。第 1 个（PHASE＝1）用斜坡荷载曲线施加预载荷；而第 2 个（PHASE＝0）不用坡斜荷载曲线继续加载。

注意：如果对同一个组元（或 PARTID）和同一个荷载标记，多次执行 EDLOAD 命令，那么会用最后一个 EDLOAD 命令的值。对于给定的组元（PARTID）和荷载标记，不能使用多个 PHASE 参数值。为符合这一设置，必须为应力初始化和瞬态曲线复制节点组元（这一

工作区仅适用于用组元定义荷载)。

- 隐式－显式连续求解（EDDRELAX,ANSYS）：在这种情况下，使用 ANSYS 隐式求解器施加预荷载以求得位移结果，并将其作为预载荷施加到 ANSYS/LS－DYNA 显式求解器的给定几何构型上，通过应力初始化得到预加载的几何实体。EDLOAD 命令中的 PHASE 必须设置为 0。

12.1.5 显式动态分析求解

1. 求解过程

当模型建好后（即完成单元类型、实常数、材料性质的定义，建立模型，网格划分，边界/初始条件指定以及加载、结束控制），执行 SOLVE 命令（GUI 菜单路径：MainMenu > Solution > Solve）就可以开始求解过程。

此时，ANSYS/LS－DYNA 程序将运行以下几步。

（1）标题记录：包括几何特性（如节点和单元等），都写到相应的两个结果文件 Jobname. RST和 Jobname. HIS 中。此时 ANSYS/LS－DYNA 数据库中包含全部相应的信息。即在运行 SOLVE 命令前，必须执行 SAVE 命令，把所有的模型信息都写入到文件 Jobname. DB。

（2）将所有输入的信息写出 LS－DYNA 程序的输入文件 Jobname. K。

（3）控制权由 ANSYS 程序转移给 LS－DYNA 程序。LS－DYNA 求解器运行的结果写入到结果文件 Jobname. RST 和 Jobname. HIS 中。如果运行 SOLVE 命令前执行命令 EDOPT, ADD,,BOTH，则也将输出用于 LS－POST 后处理程序的结果文件（d3plot 和 d3thdt 文件）。

当求解结束后，ANSYS/LS－DYNA GUI 将提醒用户求解已完成，控制权重新转回到 ANSYS/LS－DYNA 程序。可以通过 ANSYS/LS－DYNA 程序的 POST1 和 POST26 后处理器来查看结果。如果产生了错误或警告，输出窗口将自动显示弹出信息，表明有几个错误和警告。可以参考 LS－DYNA 的信息文件，其中详细记录了错误和警告。这些信息也同时被写入到 LS－DYNA d3hsp 文件。

2. LS－DYNA 终止控制

LS－DYNA 求解终止点与建模时设定的终止控制有关。主要有 3 种终止控制类型，下面分别介绍。

- 终止时间：用 TIME 命令定义分析结束时间，时间步累积达到结束时间时计算就会停止。
- CPU 时间限制：可以用 EDCPU 命令指定 CPU 时间限制（以秒为单位），在达到时间限制时就会停止计算。
- 终止判据：当指定点和刚体到达某一特定位置，或一个指定点和其他表面发生接触，可以用 EDTERM 指定结束求解。可以用这个命令设定多个判据。

一般用 TIME 命令指定分析结束时间，其他的终止控制都是可选的。程序遇到任何一种终止判据时，求解都会停止。

当执行小型重新启动（EDSTART,2）或完全重新启动（EDSTART,3）时，如果以前的分析由于 EDTERM 设定的终止判据而终止，那么必须改变或删除这个判据，以免造成重启动立即终止。

3. 共享存储器并行处理

对于大的模型，用户必须用 ANSYS/LS－DYNA 的共享存储器并行处理（SMP）功能来缩短分析所需的时间。要应用这一功能，一台机器上必须至少有两个处理器，并且必须申请合适的 ANSYS/LS－DYNA SMP 授权号。

使用 SMP 功能需注意：

- 指定使用的处理器数。可以用 config60. ans 文件、/CONFIG 命令或 SETNPROC 宏来设定这个值。如果没有设定处理器数目大于 1，那么在 GUI 中不能用合适的菜单命令来设定 SMP，EDRUN 命令设置也会变为无效。
- 执行 EDRUN 命令来定义 SMP 的运行。

当使用共享存储器并行处理时，根据每个 CPU 的利用率及工作量，计算将会以不同的顺序进行。基于此原因，在多次运行同一个文件时，可能会注意到结果间存在细微的差别。为了避免这些差别，可以指定保持一致性，不过这将使 CPU 时间增加 15%。

最好不要在一个平台上使用所有的 CPU，ANSYS 建议运行的 CPU 数比可用的要少 1 个，并且应该关闭这些 CPU 所有其他的应用，因为任何与 ANSYS/LS－DYNA 在 SMP 运行模式下的应用相竞争的计算或机器资源都会显著影响 SMP 的性能。

当使用最多达 8 个处理器时，SMP 性能成线性提高。当多于 8 个处理器时，获得的附加性能提高则很小；问题越大，性能提升潜力也越大。

4. 求解控制和监控

LS－DYNA 程序有几个控制开关，可以用来中断求解进程并检查求解状态。

当 LS－DYNA 正在运行时，在 ANSYS/LS－DYNA 程序的操作窗口中输入 CTRL－C，则将中断 LS－DYNA 程序的运行，进入 ANSYS/LS－DYNA 操作的控制命令窗口。

注意：与 ANSYS 不同，CTRL－C 并不会让用户脱离 ANSYS/LS－DYNA 的 GUI，LS－DYNA 求解器在此背景下继续进行。

5. 显示小尺寸单元

正如隐式方法和显式方法所述，ANSYS/LS－DYNA 将依据其材料特性和尺寸自动计算模型中每个单元的临界时间步长。模型中的总体时间步长将依据模型中所有单元的最小临界时间步长而定。

用户可以用 EDTP 命令根据时间步大小显示单元，监控模型中的小单元区域。根据不同的时间步长，有 3 个选项（EDTP 命令的 OPTION 域）用于显示单元。

- 选项 1：显示时间步长最小的单元。根据时间步大小每个单元呈现红色或黄色。根据 EDTP 命令的 VALUE1 域确定显示单元的数目（默认值＝100）。
- 选项 2：用最小时间步长显示和列出单元。该选项和选项 1 产生同样的单元，并且可以显示最小单元。
- 选项 3：除了显示所选单元外，该选项显示的单元和选项 1 一样。超出 VALUE1 指定数目的单元是蓝色及半透明的，其透明度与 EDTP 命令的 VALUE 域有关。

在 EDTP 生成的图中，根据其时间步大小，单元将会呈现红色（最小）、黄色（中间）或蓝色（最大）。

注意：在大模型中使用 EDTP 命令时要注意，因为其时间步长的计算要花费很多的 CPU 时间。

6. 编辑 LS－DYNA 的输入文件

ANSYS/LS－DYNA 程序支持 LS－DYNA 的大部分功能，并且可以由该程序的 GUI 界面得到。然而值得指出的是，还有一些 LS－DYNA 的功能不能从 ANSYS/LS－DYNA 的 GUI 中直接得到。例如：

- 一些材料特性，如纤维，土壤等。
- 某些单元类型，如 SEATBELT。
- 在局部坐标系下对刚体的约束。

虽然这些功能不能直接使用，但熟悉 LS－DYNA 程序的用户仍然可以从 ANSYS/LS－DYNA 程序中间接地使用这些功能。

当模型建好后，执行 EDWRITE 命令（GUI 菜单路径：Main Menu > Solution > Write Jobname. k.），创建一个 LS－DYNA 输入文件 Jobname. k（注意，如果为小型重启动，输入文件命名为 Jobname. R；如果为全启动，输入文件命名为 Jobname_nn. K）。

EDWRITE 和 SOLVE 命令的区别就是本节开头讨论的求解过程中的第 3 步将不运行。也就是说，只写出 Jobname. k（还有 ANSYS 结果文件的标题），但是 LS－DYNA 程序将不会开始求解。

执行 EDWRITE 命令后，在显式动态分析中，可以使用包含附加功能的下列任一种方法进行求解。

（1）方法 A，步骤如下。

① 退出 ANSYS/LS－DYNA 程序。

② 编辑 LS－DYNA 文件 Jobname. k 中无法从 ANSYS/LS－DYNA 程序直接得到的部分。

③ 在两个结果文件 Jobname. RST 和 Jobname. HIS 存在的目录下执行 LS－DYNA，LS－DYNA 程序运行得到的结果将加入到这两个文件中。

④ 当 LS－DYNA 程序运行结束后，进入 ANSYS/LS－DYNA 程序，用后处理器（POST1 和 POST26）查看结果。

（2）方法 B，步骤如下。

① 使用另一个窗口，进入到 ANSYS/LS－DYNA 程序运行的目录下，在原窗口下并不退出 ANSYS 程序。

② 编辑输入文件 Jobname. k 中无法从 ANSYS/LS－DYNA 程序直接得到的部分。

（3）在相同的目录下另外运行 LS－DYNA 程序（该目录下有结果文件 Jobname. RST 和 Jobname. HIS）。求解结果将加入到这些结果文件中，但并没有退出 ANSYS/LS－DYNA 的原始窗口。

（4）当 LS－DYNA 程序运行结束后，回到原来的窗口里，用 ANSYS/LS－DYNA 的后处理器查看结果。

当使用这些方法修改 Jobname. k 文件时，节点和单元都不能改变。同时也要注意到 ANSYS/LS－DYNA 中的数据库并不因 Jobname. k 文件的改变而更新。因此，当求解完成后，用 PREP7、POST1、POST26 处理器查看时，看到的是初始模型而并不是修改后的模型（由此可见，编辑关键输入文件 Jobname. k 不是 ANSYS/LS－DYNA 所支持的特性）。不管什么情况下，LS－DYNA 后处理器 LS－POST 能处理完整的计算结果（假设通过 EDWRITE 命令执行 LS－DYNA 结果文件）。

12.1.6 显式动态接触分析

ANSYS/LS－DYNA 中的接触表面可以使用户在模型中诸多 Component 之间定义多种接触类型。必须注意的是，显式动态分析中的接触与其他类型的 ANSYS 分析中的接触类型不同。在其他分析中，接触是由实际接触单元表示；而在显式动态分析中没有接触单元，只需定义接触表面（它们之间的接触类型以及相应的参数）。

1. 接触的定义

因为在显式动态分析中会发生复杂的大变形，所以确定模型内 Component 之间的接触是非常困难的。基于此原因，ANSYS/LS－DYNA 程序提供了许多功能以使接触表面间的接触定义更容易些。在 ANSYS/LS－DYNA 中采用 EDCGEN 命令来定义所有接触表面。

使用 EDCGEN 命令时遵循下列步骤：

（1）确定哪种接触类型最适合你的物理模型。

（2）定义接触实体。

（3）定义摩擦系数参数。

（4）为指定的接触类型给定一些附加输入。

（5）定义接触的杀死和激活时间。

第 1 步：定义接触类型。

为了充分地描述大变形接触和动态撞击中的复杂几何体之间的相互作用，在 ANSYS/LS－DYNA 中引入了多种接触类型，其中包括节点－表面、表面－表面、单面、单边、侵蚀、固连、固连断开、压延筋和刚体接触。对一般的分析而言，建议使用自动单面（ASSC）、自动通用（AG）、节点－表面（NTS）、表面－表面（STS）接触选项。

第 2 步：定义接触实体。

除单面接触（ASSC、SS 和 ESS）、自动通用（AG）和单边接触（SE）外，所有的接触类型都必须在发生接触的地方定义 Contact 表面和 Target 表面。这可用节点 Components、PART ID 或部件集合 ID 定义。

此外，还可以用有限元模型内当前定义的部件号或部件集合号来定义接触表面。部件集合号可以用 EDASMP 命令定义。

下面的命令行说明了怎样使用 EDCGEN 命令在模型中定义不同部件或部件集合间的接触。

```
EDCGEN,STS,1,2,.25,.23          ! 在部件 1 和部件 2 间生成面面接触
```

另外，结合 PART/部件集合和组元定义，也可以定义接触和目标表面间的接触。例如：

```
EDCGEN,NTS,N1,2,.3,.28          ! 在组元 N1 和 PART2 间生成点面接触
EDCGEN,ESTS,1,N2,.15,.15        ! 在 PART1 和组元 N2 间生成侵蚀面面接触
EDCGEN,STS,1,1,.1,.1            ! 在 PART1 间生成面面接触
```

如下例所述，也可以用 EDCGEN 命令定义部件集合间的接触。

```
EDCGEN,STS,5,6,.3,.28           ! 在部件集合 5 和 6 间生成面面接触
```

在一些特定的单面接触类型（ASCC、AG、ESS、和 SS）中无需定义 Contact 和 Target

表面。单面接触是最常用的接触类型，模型的全部外表面在整个分析中任一点都可能发生接触。程序在单面接触中将忽略任何 Contact 和 Target 表面的定义，并在执行 EDCGEN 命令时发出一条警告信息。典型的单面接触命令如下：

```
EDCGEN,ASSC,,,,.34,.34          ! 在整个模型中生成自动单面接触
```

注意：在显式分析中定义接触实体时，不允许有初始穿透。因此，定义接触组元时要注意。

第 3 步：定义摩擦系数参数。

接触摩擦系数是由静态摩擦系数（*FS*）、动摩擦系数（*FD*）和指数衰减系数（*DC*）来确定的（*FS*、*FD* 和 *DC* 可以用 EDCGEN 命令输入）。假设摩擦系数与接触表面的相对速度 V_{rel}有关：

$$\mu_c = FD + (FS - FD)\mathrm{e}^{-DC \cdot V_{rel}}$$

黏性摩擦系数 *VC*（用 EDCGEN 命令输入），可以限制最大摩擦力。公式如下：

$$F_{lim} = VC \times A_{cont}$$

式中，A_{cont}是接触时节点接触部分的接触面面积；

VC 值建议使用剪切屈服应力。

$$VC = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

式中，σ_0是接触材料的屈服应力。

为了避免在接触中产生不真实的振荡，对于薄板成型模拟，可使用垂直于接触表面的接触阻尼。接触阻尼系数计算如下：

$$\xi = \frac{VDC}{100} \times \xi_{cnt}$$

式中，*VDC* 为粘性阻尼系数（用 EDCGEN 命令输入），cnt 为 contact，接触阻尼。

$$\xi_{cnt} = 2m\omega$$

式中，$m = \min(m_{slave}, m_{master})$；

$\omega = \sqrt{k \times \frac{m_{slave} + m_{master}}{m_{slave} \times m_{master}}}$；*K*：界面刚度。

第 4 步：给定附加输入。

对于侵蚀、刚体、固连断开和压延筋接触，还需输入一些其他数据（EDCGEN 的 V1 ~ V4 选项）。这些数据因接触类型不同而各异，分别简述如下。

如果采用侵蚀表面接触（ENTS、ESS 和 ESTS），当表面实体单元发生失效时，需要在内部剩余单元重新定义接触。对于侵蚀接触 V1 ~ V3 定义如下：边界条件对称选项（V1）决定当单元表面失效时沿一个表面是否仍然保持对称性；内部侵蚀选项（V2）决定当外表面发生失效时沿内表面是否接着发生侵蚀；相邻材料选项（V3）决定当沿着自由表面发生失效时是否包括实体单元面。

刚体接触（RNTR 和 ROTR）通常用于多刚体动力学。在刚体接触中，采用一条用户定义的防止贯穿的力－挠度曲线，而不用线性刚度。因此，对于刚体接触，数据曲线号（V1）、用于给定刚体接触的力计算方法类型选项（V2）和卸载刚度值（V3）必

须输入。

固连断开接触（TSTS 和 TNTS）用于表面胶合在一起时定义接触表面失效。对于所有固连断开接触类型，需输入拉伸失效应力（V1）和剪切失效应力（V2）定义失效准则。对于节点－表面固连断开接触，法向力指数项（V3）和剪切力指数项（V4）也需输入，以定义失效准则。

压延筋接触（DRAWBEAD）用于模拟压延筋的特殊情况，压延筋在深拉作业时有助于约束坯料。在压延筋接触中，必须输入一条荷载曲线号（V1）——它给出作为压延筋位移函数的约束力弯曲分量、任选的一条曲线号（V2）——它给出作为压延筋位移函数的法向约束力，以及沿压延筋的等距积分点数（V4）。

第 5 步：定义激活或杀死时间

对于每个接触定义，都可以用 EDCGEN 命令的 BTIME 域和 DTIME 域来定义杀死和激活时间。这允许在瞬态分析的任意时刻都激活接触，然后在稍后时间内杀死。

2. 列表、显示和删除接触实体

用 EDCGEN 命令定义接触后，就可以列表、显示或删除接触实体。用 EDCLIST 命令列出所有当前定义的接触实体。定义的每个接触都给定一个参考号用于显示接触实体。

当前显式动态接触实体分为两种情况。

（1）一般的面面接触：节点接触实体 N1，节点目标实体 N2。

FS＝0. 10000　FD＝0. 08000　DC＝0. 00000　VC＝0. 00000　VDC＝0. 0000

（2）自动单面接触定义：模型的所有外表面。

FS＝0. 20000　FD＝0. 15000　DC＝0. 00000　VC＝0. 00000　VDC＝0. 0000

用户可以采用 EDPC 命令选择和显示接触实体。显示将包括节点和单元，它与定义接触表面的方法有关（也就是说，部件或组元）。采用 EDPC 命令的 MIN、MAX、和 INC 域来指定最小接触实体号、最大接触实体号和接触实体号增量。因此，对于上述说明执行 EDPC，1,2,1，就可以选择显示 STS 和 ASSC 接触定义的实体。值得注意的是，对于单面接触定义，模型中所有外部表面都将被选择和显示出来。

注意： EDPC 选择了给定接触实体的节点和单元。因此，在显示接触实体后，必须重新选择下步操作所需的所有节点和单元（SOLVE）。可采用 NSEL,ALL 和 ESEL,ALL 命令（或其他命令的合适形式）来完成。

如果接触定义不正确，可以用 EDDC 命令删除它。为了删除指定的接触实体，可执行 EDDC,DELE,Ctype,Cont,Targ。其中，Ctype 是接触类型；Cont 和 Targ 表示已定义接触的接触和目标部件或组元。要删除当前接触实体，执行 EDDC,DELE,ALL。

在小型重启动分析中不能删除接触实体（EDSTART,2），但是可以用 EDDC 命令激活（EDDC,DACT,Ctype,Cont,Targ）或杀死接触。当知道在什么阶段发生什么类型的接触时，这个特点是非常有用的。要利用此特征，必须在新分析中定义所有的接触实体（EDCGEN），并且至少执行一次小型启动。一旦定义了接触类型，就可以在不必要时杀死它，而在需要时重新激活。需要时才考虑接触，这样显著节省了 CPU 时间。

注意： 如果在新分析中用 EDDC,DELE 删除接触，其定义将从数据库中去除，也就不能在后来的分析中激活它。

显式动态全启动分析不支持 EDDC 命令（EDSTART,3）。也就是说，在前面分析已定义

的全启动中不能删除、杀死和激活接触定义。

3. 接触选项

在显式动态分析中，为了充分定义接触表面间的复余相互作用，ANSYS/LS－DYNA 提供了多达 24 种的接触类型，则表 12－2。

表 12–2　接触类型

	Single Surface	Nodes to Surface	Surface to Surface
Normal	SS	NTS	STS, OSTS
Automatic	ASSC, AG, ASS2D	ANTS	ASTS
Rigid		RNTR	ROTR
Tied		TDNS	TDSS, TSES
Tied with failure		TNTS	TSTS
Eroding	ESS	ENTS	ESTS
Edge			SE
Drawbead		DRAWBEAD	
Forming		FNTS	FSTS, FOSS

（1）定义接触类型。

从表 12–2 中可以看出，在 ANSYS/LS－DYNA 程序中主要有 3 种基本接触类型，即单面接触、节点－表面接触、表面－表面接触。

① 单面接触（SS、ASSC、AG、ASS2D、ESS）

单面接触适用于一个物体表面的自身接触或它与另一个物体表面接触。在单面接触中，ANSYS/LS－DYNA 程序将自动判定模型中哪处表面发生接触。因此，单面接触的定义是最简单的，无需定义 Contact 和 Target 表面，当定义好单面接触时，它允许一个模型的所有外表面都可能接触，这对于预先不知道接触表面的自身接触或大变形问题很有用处。与隐式模型过多定义接触面将大大增加 CPU 时间不同，在显式模型中定义单面接触只会较少地增加 CPU 时间，许多碰撞问题都需定义单面接触。由于自动通用接触（AG）很有效（它包括壳边接触（SE）和改进的梁接触），因此推荐在难以预测接触条件时，对于自身接触和大变形问题优先选择此种接触类型。

② 点－面接触（NTS、ANTS、RNTR、TDNS、TNTS、ENTS、DRAWBEAD、FNTS）

点面接触是指接触节点将穿透 Target 表面。这种接触类型通常用于两个一般表面间的接触。采用 ANSYS 隐式程序中同样的规则，需要定义 Target 表面及 Contact 表面。

- 平面或凹面为 Target 表面，凸面为 Contact 表面。
- 粗网格所在面作为 Target 面，细网格所在面为 Contact 面。
- 在定义压延筋接触时，筋总为 Contact 表面，而板料为 Target 表面。

③ 面－面接触（STS、OSTS、ASTS、ROTR、TDSS、TSTS、ESTS、SE、FSTS、FOSS、TSES）

当一个物体的表面穿透另一个物体的表面时需使用面－面接触。面－面接触是最常用的接触类型，适用于任意形状且存在较大接触面积的物体接触。这种接触类型对于物体间有大量相对滑移时很有效，例如块在平板上滑动、球在槽内滑动等。

（2）定义接触选项。

以上3种接触类型的每一种又含有多个选项，简要介绍如下。

① 通用接触（SS,NTS,STS,OSTS）

虽然通用接触的算法最简单，但它的使用范围仍很广。实际上，ANSYS/LS－DYNA 3种基本接触类型中有两种使用的是NTS和STS选项。使用通用接触最大的优点在于它们的速度很快并且很可靠。使用该种类型时，只需关心接触表面的取向。接触表面方向是指定义一个面的哪一边是实体和哪一边是“空气”。当使用实体单元时，程序自动为通用接触类型正确定向；而对于壳单元的接触，用户必须自己定义表面方向。在EDCONTACT命令中把ORIE域设置为2，它将激活接触表面自动重新定向。特别要注意，只有壳表面没有初始贯穿时才会重新定向。

② 自动接触（ASSC,AG,ASS2D,ANTS,ASTS）

与通用接触类型一样，自动接触也是使用很广泛的接触。自动接触和通用接触间的主要差别，就是它能通过自动接触算法自动确定壳单元的接触表面方向。在该选项中，将会检查壳单元每个面的接触，因此通常会限制搜索深度。如果考虑到接触表面的穿透，可以使用无限或者大搜索深度的普通接触。

③ 侵蚀接触（ESS,ENTS,ESTS）

侵蚀接触适用于当接触表面的一个或两个单元发生材料失效时。接触作用依然可在剩余单元中进行。它用于实体单元穿透或是表面产生失效贯穿等问题。使用此选项，必须在EDCGEN命令中指定对称平面选项（V1）、内外节点侵蚀选项（V2）以及临近材料处理选项（V3）。

④ 刚体接触（RNTR,ROTR）

刚体接触和通用接触中的NTS和OSTS类似，区别在于它采用一条用户自定义的力－挠度曲线而不是线性刚度来防止穿透。这种类型的接触最典型的应用是多个刚体间的相互接触。刚体接触的最大优点在于，它们可以包括能量吸收而无需用变形单元建模。但是，刚体接触（RNTR,ROTR）不能用于变形体。刚体和变形体间的接触必须用通用、自动或侵蚀选项来定义。对于刚体接触选项，必须用EDCGEN命令来指定数据曲线ID（V1）、力的计算方法（V2）和卸载选项（V3）。

⑤ 固连接触（TDNS,TDSS,TSES）

固连接触选项实际上是把接触节点（表面）和目标表面“粘合”起来，接触和目标表面开始必须共面，于是初始化时，程序会计算Contact节点（表面）在Target部分内的等参数位置。然后，在荷载或初始速度的作用下，Contact节点（表面）须在目标表面内保持它们的等参数位置。固连接触的效果就是Target表面可以变形，而Contact节点将追随其变形。定义固连接触时，较粗网格的物体需定义为Target表面。只有平移自由度（UX,UY,UZ）才会受固连接触的影响。

⑥ 固连断开接触（固连失效）（TNTS,TSTS）

固连断开接触与固连接触的区别在于Contact节点（表面）仅在达到失效准则前和Target表面固连在一起。利用一个罚刚度使得Contact节点（表面）与Target表面实现“销联接”；在达到失效准则后，接触节点（表面）可以相对于目标表面滑动或与之分离。固连断开接触的典型应用是焊点和螺栓连接。TNTS和TSTS间的主要区别就是TSTS失效与失效

应力有关，而 TNTS 则与失效力有关。使用 TSTS 时，需用 EDCGEN 命令来定义法向（V1）和切向（V2）失效应力；对于 TNTS，需用 EDCGEN 命令来定义法向（V1）和切向（V2）失效力以及法向（V3）和切向（V4）力的指数。固连失效准则如下：

$$\left[\frac{|f_n|}{f_{\text{nfail}}}\right]^{m_1}+\left[\frac{|f_s|}{f_{\text{sfail}}}\right]^{m_s}\geqslant 1$$

⑦ 单边接触（SE）

发生在垂直于壳表面法线方向的接触常用单边接触。该接触选项不需要定义接触或目标表面，常用于表面法向垂直于撞击方向的薄板成型工艺中。

⑧ 压延筋接触（DRAWBEAD）

压延筋接触用于金属成型工艺中，需要特别注意坯料的约束。在拉延和冲压模拟时，板料与成型表面脱离的现象是很常见的。压延筋接触要求使用弯曲和摩擦约束力，用来保证板料在整个压延筋厚度尺寸上保持接触。

⑨ 成型接触（FNTS、FSTS、FOSS）

成型接触主要用于金属成型工艺。对这些接触类型来说，工具和模具定义为目标面（Master），而工作部分定义为接触面（Slave）。这个选项不需用网格连接，但工具的网格必须在同一方向。由于该选项基于自动接触类型，因此在金属成型应用中非常有效。

4. 壳单元的特殊处理

用壳单元对刚体建模时必须很小心。自动点－面接触（ANTS）、自动单面接触（ASSC）、自动面－面接触（ASTS）和单面接触的定义，都必须考虑确定接触表面和搜索深度接触算法的壳体厚度。因此，刚体壳单元的厚度要符合实际，厚度太小将导致接触丢失，而厚度太大则将导致批处理算法速度的降低。对上述接触类型来说，EDCONTACT 命令的壳体厚度接触选项 SHTK 域将忽略不计。

EDCONTACT 中 SHTK 项设置为 1 或 2 对 NTS、STS、OSTS 型接触有多种影响：首先，就是直接计算接触深度，它由壳单元厚度和实体单元边长决定，而不由用户控制；其次，正如上面所说的一样，接触搜索算法变为批处理算法，网格连续就没有必要了。

5. 接触深度控制

对于通用接触类型 STS、NTS、OSTS、TNTS 和 TSTS，用户必须保证在模型中未定义虚假接触。对于这些接触类型，ANSYS/LS－DYNA 假设接触深度为 1×10^{10}（接近无限）。因此，任何时候一个接触节点贯穿到 Target 表面的后面（或 Vice－Versa），就会发生接触并产生一个与接触深度成比例的力。在显式动态分析中，由于几何体之间发生相对移动，定义多余的虚假接触是很常见的。在接触不真实的情况下，接触深度相对来说就很大，相应的接触力也会变大，从而导致模型不稳。基于上述原因，ANSYS/LS－DYNA 程序允许用户定义一个最大接触深度值，如果接触穿透超过该值，则可认为是虚假的且对它忽略不计。要控制接触穿透距离，可将 EDCONTACT 命令中的 PENCHK 域设置为 1 或 2。

在 STS、NTS、OSTS、TNTS 和 TSTS 类型的模型中，上面所说的 PENCHK 域控制所有接触定义的穿透检测。用 EDSP 命令可以改变同种类型每个单独接触定义的穿透检测。

除 STS、NTS、OSTS、TNTS 和 TSTS 外的所有其他类型的接触，其穿透深度由单元厚度自动限制，而不能由用户调整。壳单元和实体单元接触深度的表达式分别如下。

- 壳单元：

$$接触深度 = \min[壳厚度, 0.4 \times 最短边长, 0.5 \times \sqrt{area}]$$

- 实体单元：

$$接触深度 = \min\ [体积/面积,\ 0.5 \times \sqrt{area}]$$

6. 接触刚度

（1）罚因子的选择。

两个物体间发生接触时必须建立刚度的关系。如果没有接触刚度，物体之间将会互相穿透。通过两个物体间的“弹性弹簧”可以建立这种关系，这里接触力等于接触刚度（k）与穿透量（δ）的乘积。因此，两个物体间的穿透量（δ）或不相容性与刚度 k 有关。理想情况下，应没有穿透，但这意味着 $k=\infty$，从而将导致数值不稳。k 值与接触物体的相对刚度有关。在 ANSYS/LS－DYNA 程序中，接触刚度由下述关系确定。

- 实体单元片：

$$k = \frac{fs \times \text{Area}^2 \times K}{\text{Volume}}$$

- 壳单元片：

$$k = \frac{fs \times \text{Area} \times K}{\text{MinimumDiagonal}}$$

式中，Area＝接触面积；

K＝接触单元的体积模量；

fs＝罚因子（默认为0.1）。

在大多数情况下，ANSYS/LS－DYNA 程序自动确定的接触刚度参数能提供良好的结果。也可以通过 EDCONTACT 命令中的 SFSI 域输入新的罚因子值来改变所有接触面的接触刚度。由经验可知，SFSI 值超过 0.1 将会引起不稳定。

（2）对称刚度。

如果由于材料性质或单元尺寸的差别而在接触和目标表面间引起接触应力的不匹配，可能导致不稳定和不切实际的情况。可以通过调整 EDCONTACT 命令中的罚刚度选项 PENO 来克服。例如，把 PENO 设置为1，接触和目标面的刚度都将被考虑，并采用表面间的最小应力值。

如果接触刚度有很大差别，程序会将它们进行比例缩放，使其数值接近，并覆盖用户输入的比例因子。

连同相对质量，闭合接触单元是一个弹簧－质量系统，其当前稳定性判据会得出显式分析的极限时步。程序会报告一个最小时步信息。如果采用的实际步长大于信息中所列出的，则要用 EDCONTACT 命令修改不协调表面的罚函数比例，或者用 EDCTS 命令缩小实际步长。若两个时步间的差别很小，则不必用此方法。

除了用 EDCONTACT 命令的 SFI 和 PENO 选项来控制接触表面间的罚刚度外，个别接触表面（从）和目标表面（主）的刚度值也可以用 EDCMORE 命令来调整。EDCMORE 命令与 EDCONTACT 命令的区别在于，EDCONTACT 命令适用于模型中所有的接触，而 EDCMORE 命令只允许定义单个接触表面的附加接触参数。在 ANSYS/LS－DYNA 程序确定的默认刚度值不够的情况下，可以用 EDCMORE 命令的 Va1 和 Va2 域调整主从罚刚度。

7. 2D 接触选项

为了定义 PLANE162 单元的接触，在 ANSYS/LS－DYNA 程序中存在一个特定的二维接

触选项。ASS2D 是一个单面接触选项（和 ASSC 类似）。与 3－D 单元所用接触类似，可以用 EDCGEN 命令来定义 ASS2D 选项。

```
EDCGEN,ASS2D,Cont,Targ,FS,FD,DC,…BTIME,DTIME
```

对于 2－D 接触，只有 Parts 可以用来定义接触和目标组元。使用 ASS2D 仅可使用 FS、FD、DC、BTIME、DTIME 域。在 2－D 接触中，EDCGEN 命令的所有其他域都将被忽略。

12.1.7 显式动态分析的材料模型

ANSYS/LS－DYNA 提供了 40 多种材料模型，可以表示广泛的材料特性。可用材料模型分别简介如下（括号内将列出与每种材料模型相对应的 LS－DYNA 材料号）。

（1）线性弹性模型：

- 各向同性（#1）。
- 正交各向异性（#2）。
- 各向异性（#2）。
- 弹性流体（#1）。

（2）非线性弹性模型：

- Blatz－ko 橡胶（#7）。
- Mooney－Rivlin 橡胶（#27）。
- 黏弹性（#6）。

（3）非线性性无弹性模型：

- 双线性各向同性（#3）。
- 与温度有关的双线性各向同性（#4）。
- 横向各向异性硬化（#37）。
- 横向各向异性 FLD 硬化（#39）。
- 双线性随动（#3）。
- 塑性随动（#3）。
- 3－参数 Barlat（#36）。
- Barlat 各向异性塑性（#33）。
- 应变率敏感的幂函数式塑性（#64）。
- 与应变率有关的塑性（#19）。
- 复合材料破坏（#22）。
- 混凝土破坏（#72）。
- 分段线性塑性（#24）。
- 幂函数塑性（#18）。

（4）与压力有关的塑性模型：

- 弹塑性流体动力学（#10）。
- 地质帽盖模型（#25）。

（5）泡沫模型：

- 闭合多孔泡沫（#53）。

- 黏性泡沫（#62）。
- 低密度泡沫（#57）。
- 可压缩泡沫（#63）。
- Honeycomb（#26）。

（6）需要状态方程的模型

- Bamman 塑性（#51）。
- Johnson－Cook 塑性（#15）。
- 空材料（#9）。
- Zerilli－Armstrong（#65）。
- Steinberg（#11）。

（7）离散单元模型：

- 线弹性弹簧。
- 普通非线性弹簧。
- 非线性弹性弹簧。
- 弹塑性弹簧。
- 非弹性拉伸或仅压缩弹簧。
- 麦克斯韦黏性弹簧。
- 线黏性阻尼器。
- 非线黏性阻尼器。
- 索（缆）（#71）。

（8）刚体模型：刚体（#20）。

1. 定义显式动态分析的材料模型

用户可以采用 ANSYS 命令 MP，MPTEMP，MPDATA，TB，TBTEMP 和 TBDATA 以及 ANSYS/LS－DYNA 命令 EDMP 来定义材料模型。

通过 GUI 菜单路径定义材料模型比使用命令直接得多：

（1）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 窗口。

注意：如果不事先定义 ANSYS/LS－DYNA 单元类型，那么就不能定义 ANSYS/LS－DYNA 材料模型。

（2）在 Material Models Available 列表框中双击 LS－DYNA，然后选择一种类型的材料模型，如线性、非线性、状态方程、离散单元或刚体。

（3）双击一种材料的子目录。例如，在非线性材料中，有弹性、非弹性和泡沫材料模型。

（4）继续双击下面的材料分类，直到数据输入对话框出现。

（5）输入所需的值，单击 OK 按钮。此时回到 Define material Model Behavior 窗口，就可以看到在 Material Models Defined 列表框中已列出了刚才定义的材料模型的类型和编号。

如果要修改已定义的材料模型，可以在 Define Material Model Behavior 窗口中双击 Material Models Defined 列表框中的材料模型，在弹出的对话框中修改其值，然后单击 OK 按钮。

用户可以选择 Edit > Copy 命令并指定新模型号来复制现有材料模型的内容，复制的材

料模型以新模型号列在 Material Models Defined 列表框中，其内容与原材料模型内容相同。

单击模型号选定它，然后选择 Edit > Delete 命令，可以删除材料模型。

如果用户通过 GUI 菜单路径来定义、修改、复制或删除材料模型，ANSYS 将自动发出正确命令并将其写入 Log 文件中。

2. 有关显式动态分析材料模型的描述

当采用交互工作方式时，所有材料模型的可用特性都出现在材料模型对话框中。当使用批处理或命令流方式时，相应的命令都提供在这里。要保证定义材料属性为模型列出的，不要定义与模型无关的数据。

（1）线性弹性模型

① 各向同性弹性模型。使用 MP 命令输入所需参数：

```
MP,DENS(密度)
MP,EX(弹性模量)
MP,NUXY(泊松比)
```

② 正交各向异性弹性模型。用 MP 命令输入所需参数：

```
MP,DENS(密度)
MP,EX(弹性模量(EY,EZ);需一值)
MP,NUXY(从泊松比(NUXY,NUXZ);需一值)
MP,PRXY(主泊松比(PRYZ,PRXZ);需一值)
MP,GXY(剪切模量(GYZ,GXZ);需一值)
```

当仅给定一个值（如 EX）时，其他值将自动定义（EY = EZ = EX）。使用 EDLCS 和 EDMP,ORTHO 命令定义材料坐标系。如果没有给定材料坐标系，材料特性将单元的 I、J、L 节点定义的材料轴保持正交各向异性。对于多层复合壳，用 TB,COMP 命令代替，并作为 SHELL163 单元实常数给定层性质。

③ 各向异性弹性模型的描述需要全弹性矩阵。由于其对称性，仅需 21 种常数。这种材料仅对 SOLID164 单元和 PLANE162 单元有效（轴对称和平面应变问题）。

用 MP 命令输入密度；用 TB,ANEL 命令以上三角形式输入常数；用 EDLCS 和 EDMP,ORTHO 命令定义材料方向轴。如果没有定义材料坐标系，材料性质将与单元的 I、J、L 节点所定义的材料轴保持正交各向异性。

```
MP,DENS(密度)
TB,ANEL
TBDATA,1,C11,C12,C22,C13,C23,C33
TBDATA,7,C14,C24,C34,C44,C15,C25
TBDATA,13,C35,C45,C55,C16,C26,C36
TBDATA,19,C46,C56,C66
```

当用户使用 TBLIST 显示材料类型的数据信息时，这些常数以下三角形式［D］出现而不是上三角形式[C]。这一矛盾不是计算错误，材料数据已准确传递给 LS – DYNA 程序。

④ 弹性流体模型用于模拟动态冲击荷载作用下盛满流体的容器。可以用 MP 命令输入密度（DENS），用 EDMP 命令定义材料模型为弹性流体。

```
MP,DENS
EDMP,FLUID,MAT,VAL1
```

流体模型要求指定体积模量，可以在上述命令的 VAL1 域输入。除了使用 EDMP 外，用户也可用 MP 命令输入弹性模量（EX）和泊松比（NUXY）。

```
MP,EX
MP,NUXY
```

然后程序将计算体积模量：

$$K=\frac{E}{3(1-2\nu)}$$

如果 VAL1（EDMP 内）、EX 和 NUXY 都指定了，VAL1 将用作体积模量。

（2）非线性弹性模型

① Blatz－ko 弹性橡胶模型使用第 2 类 Piola－Kirchoff 应力：

$$S_{ij}=G\left[\frac{1}{V}C_{ij}-V^{\left(\frac{1}{1-2\nu}\right)}\delta_{ij}\right]$$

式中，G：剪切模量；

V：相对体积；

ν：泊松比；

C_{ij}：右柯西－格林应变张量；

δ_{ij}：Kronecker delta。

用 MP 命令输入密度（DENS）和剪切模量（GXY）。

② Mooney－Rivlin 橡胶弹性模型：不可压缩橡胶模型。它与 ANSYS 的 Mooney－Rivlin 2－参数模型很相似。输入 C_{10}、C_{01} 和 ν 来定义应变能量密度函数：

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+C\left[\frac{1}{I_3^2}-1\right]+D(I_3-1)^2$$

$$C=\frac{C_{10}}{2}+C_{01}$$

$$D=\frac{C_{10}(5\nu-2)+C_{01}(11\nu-5)}{2(1-2\nu)}$$

式中，I_1、I_2 和 I_3：右柯西－格林张量不变量。

用 MP 命令输入泊松比（ν）和密度（泊松比的值要比推荐的大一些，太小的值不能工作）。用 TB 和 TBDATA 命令输入 Mooney－Rivlin 常数，只允许一种温度下的数据，并且必须放在数据表中的第 1 个和第 2 个位置。

```
TB,MOONEY,,,,0
TBDATA,1,C10
TBDATA, 2, C01
```

如果不直接输入 C_{01} 和 C_{10}，可以将这些常数设置为 0，然后用荷载曲线提供表格式单轴数据。程序将根据 TBDATA 命令的第 3～6 项所输入的实验数据来计算这些常数。使用这种输入法，必须设置 TB 命令的 TBOPT＝2。

```
TB,MOONEY,,,,2
TBDATA,1,C10（设为0，应用实验数据）
TBDATA, 2, C01（设为0，应用实验数据）
```

```
TBDATA,3,C3 (试样测量长度L0)
TBDATA, 4, C4 (试样测量宽度)
TBDATA, 5, C5 (试样厚度)
TBDATA, 6, C6 (荷载曲线 ID)
```

提供单轴数据的荷载曲线应使测量长度 ΔL 随相应力的变化而变化。在压缩中，力和长度变化须为负值。在拉伸中，力和测量长度变化须为正值。单轴方向的主拉伸比 λ_1 由下式给出：

$$\lambda_1 = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0}$$

式中，L_0：初始长度；

L：实际长度。

也可以通过设置测量长度、厚度和宽度为 1.0，并且在测量长度变化处定义工程应变以及在有作用力的地方定义名义（工程）应力，来输入应力－应变曲线。

在 ANSYS/LS－DYNA 求解的初始阶段，用最小二乘法来处理输入的实验数据。

③ 黏弹性模型

Herrmann 和 Peterson 提出的线性黏弹性模型采用偏量特性：

$$\sigma_{ij} = 2\int_0^t \phi(t-\tau)\left[\frac{\partial \varepsilon'_{ij}(\tau)}{\partial \tau}\right]\mathrm{d}x$$

这里剪切松弛模量由下式给出：

$$\phi(t) = G_\infty + (G_0 - G_\infty)e^{-\beta t}$$

在模型中，由体积 V 计算增量积分压力时，需事先进行弹性体积假设，即 V：$p = K$。用参数 G_∞、G_0、K（体积模量）和 β 来定义线性黏弹性模型。用 TB,EVISC 和 TBDATA 命令的第 46、47、48 和 61 项输入以上数据：

```
TB,EVISC
TBDATA,46,G0
TBDATA, 47, G∞
TBDATA, 48, K
TBDATA, 61, 1/β
```

注意：对于这种材料选项，必须用 MP 命令定义密度（DENS）。

（3）非线性无弹性模型

① 双线性各向同性模型：使用两种斜率（弹性和塑性）来表示材料应力应变行为的经典双线性各向同性硬化模型（与应变率无关）。仅可在一个温度条件下定义应力应变特性（也有温度相关的本构模型，参见 Temperature Dependent Bilinear Isotropic Model）。用 MP 命令输入弹性模量（Exx）、泊松比（NUXY）和密度（DENS），程序用 EX 和 NUXY 值计算体积模量（K）。用 TB 和 TBDATA 命令的第 1、2 项输入屈服强度和切线模量：

```
TB,BISO
TBDATA,1,σY (屈服应力)
TBDATA, 2, Etan (切线模量)
```

② 与温度有关的双线性各向同性模型是应变率无关、用两种斜率（弹性和塑性）来表

示材料应力应变特性的经典双线性各向同性硬化模型。可以在 6 种不同的温度下定义应力应变行为。如果仅在一种温度下定义应力应变行为，就需假定双线性各向同性材料模型（与应变率和温度无关）。

用 MP 命令输入密度（DENS）（与温度无关）。用 MPTEMP 和 MPDATA 输入弹性模量（Exx）、泊松比（NUXY）和热胀系数（ALPX）（这些特性和温度有关）。用 TB,BISO,,NTEMP 和 TBTEMP 以及 TBDATA 命令的第 1、2 项输入屈服强度和切线模量。屈服强度和切线模量必须相对于同一温度定义，在 MPTEMP 命令中输入。

```
MP,DENS
MPTEMP,1,TEMP1, TEMP2, …, TEMPntemp
MPDATA, EX,, 1, EX1, EX2, …, EXntemp
MPDATA, NUXY,, 1, NUXY1, NUXY2, …, NUXYntemp
MPDATA, ALPX,, 1, ALPX1, ALPX2, …, ALPXntemp
TB, BISO,, NTEMP（NTEMP 可为 2 ~6）
TBTEMP, TEMP1（第 1 个温度点）
TBDATA, 1, σY（屈服应力）
TBDATA, 2, Etan（切线模量）
TBTEMP, TEMP2（第 2 个温度点）
TBDATA, 1, σY（屈服应力）
TBDATA, 2, Etan（切线模量）
（重复此形式 NTEMP 次）
TBTEMP, TEMPntemp（最后一个温度点）
TBDATA, 1, σY（屈服应力）
TBDATA, 2, Etan（切线模量）
```

注意：对于这些材料模型，必须提供足够范围的温度数据，使之能够覆盖分析中的实际温度；否则，分析将会中止。

③ 横向各向异性硬化模型是仅供壳单元和 2－D 单元使用的全迭代各向异性塑性模型。在此模型中，由 HILL 给出的屈服函数在平面应力情况下简化。

应力应变仅定义在一种温度下。用 MP 命令输入弹性模量（Exx）、密度（DENS）和泊松比（NUXY）。用 TB,PLAW,,,,7 和 TBDATA 命令的第 1 ~4 项输入屈服应力、切线模量、各向异性硬化参数以及有效屈服应力相对于有效塑性应变的荷载曲线 ID 号。

```
TB,PLAW,,,,7
TBDATA,1,σY（屈服应力）
TBDATA, 3, R（各向异性硬化参数）
TBDATA, 2, Etan（切线模量）
TBDATA, 4, LCID（屈服应力和塑性应变的荷载曲线 ID）
```

④ 横向各向异性 FLD 硬化模型用于模拟各向异性材料的板料成型。仅考虑横向各向异性材料。对于此模型，可以用定义的荷载曲线来模拟流动应力和有效塑性应变的关系（EDCURVE）。另外，还可以定义成型极限图（也可用 EDCURVE），ANSYS/LS－DYNA 程序用此图来计算材料所承受的最大应变比。

这一塑性模型仅在壳单元和 2－D 单元中使用。这一模型遵循前边所述的横向各向异性弹塑性模型所介绍的塑性理论。

使用横向各向异性 FLD 模型，需用 MP 命令输入密度（DENS）、弹性模量（Exx）和泊

松比（NUXY）。如下所示，可以用 TB,PLAW,,,,10 和 TBDATA 命令中的第 1 ~5 项定义其他参数。

```
TB,PLAW,,,,10
TBDATA,1,σY（屈服应力）
TBDATA，2，Etan（切线模量）
TBDATA，3，R（各向异性硬化参数）
TBDATA，4，LCID1（有效应力和塑性应变的荷载曲线）
TBDATA，5，LCID2（定义 FLD 的荷载曲线）
```

⑤ 双线性随动模型是（与应变率无关）经典的双线性随动硬化模型，用两个斜率（弹性和塑性）来表示材料的应力应变特性。用 MP 命令输入弹性模量（Exx）、密度（DENS）和泊松比（NUXY）。可以用 TB,BKIN 和 TBDATA 命令中的第 1 ~2 项输入屈服强度和切线模量。

```
TB,BKIN
TBDATA,1,σY（屈服应力）
TBDATA，2，Etan（切线模量）
```

⑥ 塑性随动模型是各向同性、随动硬化或各向同性和随动硬化的混合模型，与应变率有关，可考虑失效。通过在 0（仅随动硬化）和 1（仅各向同性硬化）间调整硬化参数 β 来选择各向同性或随动硬化。应变率用 Cowper – Symonds 模型来考虑，用与应变率有关的因数表示屈服应力。

应力应变特性只能在一个温度条件下给定。用 MP 命令输入弹性模量（Exx）、密度（DENS）和泊松比（NUXY）。用 TB,PLAW,,,,1 和 TBDATA 命令中的第 1 ~6 项输入屈服应力、切线斜率、硬化参数、应变率参数 C 和 P，以及失效应变。

如下所示，可以用 TB,PLAW,,,,10 和 TBDATA 命令中的第 1 ~5 项定义其他参数。

```
TB,PLAW,,,,1
TBDATA,1,σY（屈服应力）
TBDATA，2，Etan（切线模量）
TBDATA，3，β（硬化参数）
TBDATA，4，C（应变率参数）
TBDATA，5，P（应变率参数）
TBDATA，6，εf（失效应变）
```

⑦ 3 – 参数 Barlat 模型是由 Barlat Lian 提出的各向异性塑性材料模型，用于平面应力条件下的铝质薄板模型。该模型采用了指数和线性硬化法则。用 MP 命令输入弹性模量（Exx）、密度（DENS）和泊松比（NUXY）。硬化准则类型 HR（线性为 1 或指数为 2）、切线模量（HR = 1）或屈服系数（HR = 2）、屈服应力（HR = 1）或硬化系数（HR = 2）、Barlat 指数、m、厚度和宽度方向的应变比以及正交各向异性材料轴，用 TB,PLAW,,,,3 和 TBDATA 命令的第 1 ~8 项输入。

⑧ Barlat 各向异性塑性模型是由 Barlat，lege 和 Berm 发展的各向异性塑性模型，用于模拟成型过程的材料特性。

```
TB,PLAW,,,,6
TBDATA,1,k（强度系数）
TBDATA,2,ε0（初始应变）
```

```
TBDATA,3,n (硬化系数)
TBDATA,4,m (流动指数(Barlat))
TBDATA,5,a
TBDATA,6,b
TBDATA,7,c
TBDATA,8,f
TBDATA,9,g
TBDATA,10,h
```

⑨ 应变率敏感的幂函数式塑性模型是与应变率有关的塑性模型，主要用于超塑性成型分析。该模型遵循 Ramburgh －Osgood 本构关系。

应力－应变关系只能定义于一个温度下。用 MP 命令输入弹性模量（Exx）、密度（DENS）和泊松比（NUXY）。用 TB,PLAW,,,,4 和 TBDATA 命令的第 1 ~4 项定义材料常数、硬化系数、应变率灵敏系数及初始应变率。

```
TB,PLAW,,,,4
TBDATA,1,k(材料常数)
TBDATA,2,m(硬化系数)
TBDATA,3,n(应变率灵敏系数)
TBDATA,4,ε̇0(初始应变率)
```

⑩ 与应变率有关的塑性模型是指应变率相关各向同性塑性模型，主要用于金属和塑性成型分析。在此模型中，荷载曲线用来描述初始屈服强度与有效应变率之间的函数关系。

应力－应变特性仅定义于同一温度下。用 MP 命令输入弹性模量（Exx）、密度（DENS）和泊松比（NUXY）。定义初始屈服应力和有效应变率的荷载曲线号、切线模量，定义弹性模量和有效应变率的荷载曲线号，定义切线模量和有效应变率的荷载曲线 ID，定义 Von Misess 失效应力和有效应变率的荷载曲线号，用 TB,PLAW,,,,5 和 TBDATA 命令的第 1 ~5 项输入。对于壳单元，可在第 6 项中给定 Mn Time，取代第 5 项中的 LCID4 定义材料失效。Mn Time 为自动删除单元的最小步长。

```
TB,PLAW,,,,5
TBDATA,1,LCID1(定义初始屈服应力和有效应变率的荷载曲线 ID)
TBDATA,2,Etan(切向(塑性硬化)模量)
TBDATA,3,LCID2(定义弹性模量和有效应变率的荷载曲线 ID)
TBDATA,4,LCID3(定义切线模量和有效应变率的荷载曲线 ID)
TBDATA,5,LCID4(定义 Von Misess 失效应力和有效应变率的荷载曲线 ID)
TBDATA,6,Mn Time(自动删除单元的最小步长,仅用于壳单元)
```

⑪ 复合材料破坏模型是由 Chang&Chang 发展的复合材料失效模型。该模型采用如下 5 个参数：

- S1：轴向拉伸强度。
- S2：横向拉伸强度。
- S12：剪切强度。
- C2：横向压缩强度。
- α：非线性剪切应力参数。

所有参数均由实验确定。用 MP 命令输入弹性模量（Exx,Eyy,Ezz）、剪切模量（Gxy,

Gyz, Gxz)、密度（DENS）和泊松比（NUXY, NUYZ, NUXZ）。压缩失效时的体积模量、剪切强度、轴向拉深强度、横向拉深强度、横向压缩强度以及非线性剪切应力参数，用 TB, COMP 和 TBDATA 命令的第 1 ~6 项输入。

```
TB,COMP
TBDATA,1,KFAIL(压缩失效时的体积模量)
TBDATA,2,S12(剪切强度)
TBDATA,3,S1(轴向拉伸强度)
TBDATA,4,S2(横向拉伸强度)
TBDATA,5,C2(横向压缩强度)
TBDATA,6,α (非线性剪切应力参数)
```

⑫ 混凝土破坏模型用于分析承受混合冲击荷载的钢筋加强混凝土材料。这一模型要求混凝土和加强材料常数以及状态方程。用 MP 命令输入密度（DENS）和泊松比（NUXY），用 TB, CONCR, , , ,2 命令和 TBDATA 命令的第 1 ~78 项输入下列值。

TB,CONCR, , , ,2
TBDATA,1,σ_f(失效的最大主应力)
TBDATA,2,A_0(内聚常数)
TBDATA,3,A_1(压力硬化系数)
TBDATA,4,A_2(压力硬化系数)
TBDATA,5,A_0^r(屈服内聚力)
TBDATA,6,A_1^r(屈服极限的压力硬化系数)
TBDATA,7,A_2^r(屈服极限的压力硬化系数)
TBDATA,8,A_1^F(失效材料的压力硬化系数)
TBDATA,9,A_2^F(失效材料的压力硬化系数)
TBDATA,10,β_1(破坏比例因子)
TBDATA,11,β_2(单轴拉伸的破坏比例因子)
TBDATA,12,β_3(3 轴拉伸的破坏比例因子)
TBDATA,13,PRE(加强筋的百分比)
TBDATA,14,E_Y(加强筋的弹性模量)
TBDATA,15,$NUXY_Y$(加强筋的泊松比)
TBDATA,16,σ_y(初始屈服应力)
TBDATA,17,E_{tan}(切线模量)
TBDATA,18,LCP(主材料速率敏感度的荷载曲线 ID)
TBDATA,19,LCR(加强筋速率敏感度的荷载曲线 ID)
TBDATA,20 -32,$\lambda_1 - \lambda_{13}$(破坏函数 1 ~13)
TBDATA,33 -45,$\eta_1 - \eta_{13}$(比例因子 1 ~13)
TBDATA,46,GAMA(温度常数)
TBDATA,47,E_0(初始内部能量)
TBDATA,48,V_0(初始相对体积)
TBDATA,49 -58,$\varepsilon_{V1} - \varepsilon_{V10}$(体积应变数据值 1 ~10;相对体积自然记录)
TBDATA,59 -68,$C_1 - C_{10}$(体积压力值)
TBDATA,69 -78,$T_1 - T_{10}$(温度值)

⑬ 分段线性塑性模型是多线性弹塑性材料模型，可输入与应变率有关的应力应变曲线。它是一个很常用的塑性准则，特别用于钢模型。采用这种材料模型，也可根据塑性应变定义失效。采用 Cowper – Symbols 模型考虑应变率的影响。

用 MP 命令输入弹性模量（Exx）、密度（DENS）和泊松比（NUXY）。使用 TB, PLAW, , , ,8 和 TBDATA 命令的第 1 ~7 项输入屈服应力、切线模量、失效的的有效塑性真应

变、应变率参数 C、应变率参数 P，定义有效全应力相对于有效塑性真应变的荷载曲线 ID 以及定义应变率缩放的荷载曲线 ID。

```
TB,PLAW,,,,8
TBDATA,1,σy(屈服应力)
TBDATA,2,Etan(切线模量)
TBDATA,3,εF(失效时的有效塑性真应变)
TBDATA,4,C(应变率参数)
TBDATA,5,P(应变率参数)
TBDATA,6,LCID1(定义有效全应力相对于有效塑性真应变的荷载曲线)
TBDATA,7,LCID2(关于应变率缩放的荷载曲线)
```

注意：如果采用荷载曲线 LCID1，则用 TBDATA 命令输入的屈服应力和切线模量将被忽略。另外，如果 C 和 P 设置为 0，则略去应变率影响。如果使用 LCID2，用 TBDATA 命令输入的应变率参数 C 和 P 将被覆盖。只考虑真实应力和真实应变数据。

⑭ 幂函数塑性模型：用于金属和塑性成型分析的与应变率有关的塑性模型。该模型提供各向同性硬化的弹塑性行为，并且它用一个包括 Cowper - Symbols 乘子的幂函数本构关系来描述应变率的影响。

用 TB,PLAW,,,,2 和 TBDATA 命令的第 1 ~4 项输入强度系数、硬化系数和应变率参数 C 和 P。

```
TB,PLAW,,,,2
TBDATA,1,k(强度系数)
TBDATA,2,n(硬化系数)
TBDATA,3,C(应变率参数)
TBDATA,4,P(应变率参数)
```

(4) 与压力有关的塑性模型

弹塑性流体动力学模型用于模拟承受大应变的材料。这里塑性特性可以由一系列数据点或屈服应力和切线模量定义。如果指定了有效真实塑性应变和应力值，应力应变特性可以由有效真实应力与真实塑性应变曲线的数据点定义。最多可以定义 16 个数据点。如果应变值超过了最大输入值，将使用线性插值。因此，需输入其他值来覆盖分析中所有的应变值。用 MP 命令输入密度（DENS）、弹性模量（EX）和剪切模量（GXY）。用 TB,PLAW,,,,9 和 TBDATA 命令的第 1 ~45 项输入下列参数：

```
TB,PLAW,,,,9
TBDATA,1,σ0(初始屈服应力)
TBDATA,2,Ek(硬化模量)
TBDATA,3,PC(截断压力值)
TBDATA,4,εf(失效应变)
TBDATA,5 -20,ε1 -ε16(有效应变数据曲线值)
TBDATA,21 -36,σ1 -σ16(有效应力数据曲线值)
TBDATA,37,C0(状态常数的线性多项式方程)
TBDATA,38,C1(状态常数的线性多项式方程)
TBDATA,39,C2(状态常数的线性多项式方程)
TBDATA,40,C3(状态常数的线性多项式方程)
TBDATA,41,C4(状态常数的线性多项式方程)
TBDATA,42,C5(状态常数的线性多项式方程)
TBDATA,43,C6(状态常数的线性多项式方程)
```

```
TBDATA,44,E0(初始内能)
TBDATA,45,V0(初始相对体积)
```

（5）刚体模型

用 EDMP 命令定义刚体。例如，定义材料 2 为刚体，执行 EDMP,RIGIS,2。用指定材料号定义的所有单元都认为是刚体的一部分。材料号、单元类型号和实常数号用来定义刚体的 PART ID。这些 PAR TID 用于定义刚体的荷载和约束。刚体内的单元不必用连接性网格连接。因此，为了在模型中表示多个独立的刚体，必须定义多个刚体类型。但是，两个独立刚体不能共用一个节点。

使用 EDMP 命令的同时，必须用 MP 命令定义刚体材料类型的杨氏模量（Ex）、泊松比（NUXY）和密度（DENS）。必须指定实际的材料特性值，从而使程序能计算接触表面的刚度。基于此原因，在显式动态分析中，刚体不要用不切实际的杨氏模量或密度。刚体不能再变硬，因为它已是完全刚硬的。

因为刚体的质量中心的运动传递到节点上，所以不能用 D 命令在刚体上施加约束。刚体的一个节点上的约束和初始速度将转换到物体的质心。但是，如果约束了多个节点，就很难确定使用哪种约束。要正确在刚体上施加约束，可使用 EDMP 命令的平移（VAL1）和转动（VAL2）约束参数域。

- VAL1：平移约束参数（相对于全局笛卡尔坐标系）。
- 0：没有约束（默认）。
- 1：约束 X 方向的位移。
- 2：约束 Y 方向的位移。
- 3：约束 Z 方向的位移。
- 4：约束 X 和 Y 方向的位移。
- 5：约束 Y 和 Z 方向的位移。
- 6：约束 Z 和 X 方向的位移。
- 7：约束 X，Y，Z 方向的位移。
- VAL2：转动约束参数（相对于全局笛卡尔坐标系）。
- 0：没有约束（默认）。
- 1：约束 X 方向的旋转。
- 2：约束 Y 方向的旋转。
- 3：约束 Z 方向的旋转。
- 4：约束 X，Y 方向的旋转。
- 5：约束 Y 和 Z 方向的旋转。
- 6：约束 Z 和 X 方向的旋转。
- 7：约束 X，Y 和 Z 方向的旋转。

例如，命令 EDMP,IGID,2,7,7 将约束材料的刚体单元的所有自由度。

在定义刚体之后，可以用 EDIPART 命令指定惯性特性、质量和初始速度矢量。如果没有定义刚体的惯性特性，程序将会依据有限元模型计算它们。

12.1.8 显式动态分析中的刚体

用刚体定义有限元模型中的刚性部分可以大大减少显式分析的计算时间。这是由于定义一个刚体后，刚体内所有节点的自由度都耦合到刚体的质心上。因此，不论定义了多少节点，刚体仅有6个自由度。采用默认设置时，每个刚体的质量、质心和惯性都由刚体体积和单元的密度计算得到。作用在刚体上的力和力矩由每个时间步的节点力和力矩合成，然后计算刚体的运动，位移就会转换到节点上。

在ANSYS/LS-DYNA中，将分析中保持刚性特性的刚体定义为一种材料模型。用EDMP命令定义这种类型的刚体。

另外，可以用EDCRB命令把两个刚体结合在一起，其作用如同一个刚体。但与刚体的定义不同的是，它主要依据材料号、根据PART ID定义的刚体约束和一个约束方程号。因此，为了在两个物体间施加刚体约束，必须执行命令EDCRB,ADD,NEQN,PARTS。其中，NEQN为约束方程参考编号，PARTM是主刚体Part号，PARTS是从刚体Part号。必须要注意，不能用同一个NEQN值执行多个EDCRB命令，仅使用最后一个NEQN值。当使用EDCRB命令时，第2个刚体将被第1个刚体吸收，因而此后对第二个刚体的任何操作将无效。

1. 定义惯性特性

默认时，程序将计算每个刚体的惯性特性。但是，用户可能会发现给刚体设定重力、质量、初始速度（在全局或局部坐标系）的特定中心和特定惯性张量是很有用的，而不是依赖于求解过程中由有限元模型计算得到的值。可以用EDIPART命令来定义刚体的任意特征，命令格式如下。

```
EDIPART,PART,Option,Cvect,TM,IRCS,Ivect,CID
```

- PART：定义惯性的Part ID。
- Option：要执行的选项。
- Cvect：包括部件质心坐标系的矢量。
- TM：平移质量。
- IRCS：惯性张量参考坐标系的标志。
- Ivect：包括惯性张量分量的矢量。
- Vvect：包括刚体初始速度的矢量。
- CID：局部坐标系ID。

如果通过ANSYS/LS-DYNA GUI菜单路径来完成，可以选择Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Inertia Options > Define Inertia命令，输入上述所有参数，包括所需的矩阵参数。对于批处理输入，在执行EDIPART命令前需定义数组（DIM）并输入数据参数。下例说明了怎样定义部件2的惯性特性，此为一个刚体。

```
! 定义参数输入
tm = 0.6300E-03(平移质量)
ircs = 0(坐标系标志)
cid = 0(坐标系ID)
!
```

```
/prep7
!
! 生成含有多个部件(包含部件号为 2 的部件)的刚体模型
edmp,rigid(定义刚体)
edpart,create(生成 Part 列表)
! 定义所需矩阵
*dim,coord2,,3
*dim,velo2,,6
*dim,inert2,,6
!
! 给矩阵赋值
coord2(1) =0.2450E+01,0.5000E+00,0.5000E+00
velo2(1) =0,10.0E-7,0
inert2(1) =0.3150E-03,0,0,0.2851E-03,0,0.2851E-03
!
EDIPART,2,ADD,coord2,tm,ircs,inert2,velo2,cid
!
```

2. 加载

可用 EDLOAD 命令对刚体施加位移和速度荷载。注意，位移和速度是施加在 PART 号上而不是在节点 Component 上。一个典型的命令如下：

```
EDLOAD,ADD,RBUX,,2,PAR1,PAR2
```

该命令就是对刚体 PART2 定义 UX 位移，PART 号定义在 EDLOAD 命令的 Cname 项内（注意，对于其他类型的加载，该项为 Component 名；而对刚体而言，该项为 PART 号而非 Component 名）。该 PART 号必须与 EDMP 命令定义的刚体相对应。

3. 变形体和刚体部件间的转换

在一些动力学应用中，如果模型中大部分单元都是可变形的，那么持续时间较长的刚体运动的计算量就会极为庞大。摩托车轮就是这样一个例子，车轮翻滚持续较长时间，相对于后来的撞击会占用更多的 CPU。为了提高这种应用的计算效率，ANSYS/LS-DYNA 提供了这样一种转换性能，即把某些材料从变形状态转换至刚性状态，然后再转换到变形状态。通过在刚体运动过程中将变形体转换为刚体，可以节省大量的 CPU 时间。

变形体/刚体转换本质上和重启动操作联系在一起，用户需要停止分析，定义部件转换，然后再重新启动分析。虽然在开始分析时不用转换部件，但必须在新分析中设定一个标志，使 LS-DYNA 了解模型中所有材料在计算中都有可能变为刚体。在开始分析时执行 EDRD 或 EDRI 命令设定这一标志。

注意：用 EDMP,RIGID 定义的刚体永远都是刚体，不能转换成变形体。

要将变形体转换为刚体部件，可通过 GUI 菜单路径 main menu > Solution > Rigid 执行下列命令来实现。

```
EDRD,D2R,PART,MRB
```

这里，PART 是部件号，MRB 为主刚体，转换部件要融合在其中。如果不想让此部件和另一个刚体融合，仅留 MRB 为空白即可。

一旦使用上述命令把变形体转换为刚体后，就可以接着执行如下命令将其再转换回来。

```
EDRD,R2D,PART
```

在新分析中，如果没有变形体转换成刚体，可以在重启动中定义转换，执行 EDRD，D2R 命令。(在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Rigid – Deformable > Switch 命令，然后选择 Initialize）即可。

转换变形体为刚体时，可以用 EDRI 命令（Main Menu > Solution > Rigid – Deformable > InertiaProperties）定义刚体的惯性特性。如果不定义惯性特性，它们将由程序计算。

在变形体转换为刚体后，变形体上定义的一些约束变为无效。为了避免计算的不稳定，需用 EDRC 命令（Main Menu > Solution > Rigid – Deformable > Controls）来改变这些约束的状态。

为了使刚体转换能正常工作，单元算法的选择是很关键的。在现行 LS – DYNA 中，Hughes – Liu 壳和梁单元不能用于部件转换。因为其应用的是应变和应力更新算法。不能使用的单元算法有：SHELL163 的 KEYOPT(1) =1,6,7,11、BEAM161 的 KEYOPT(1) =0 和 1。

对于 SOLID164 单元，要特别注意的是，当刚体转换为变形体时，单元应力为零以去除虚拟特性。

4. 节点刚体

与用 EDMP 命令定义的典型刚体不同，节点刚体和部件号无关。用 EDCNSTR,ADD,NRB,COMP1 定义节点刚体。其中，COMP1 是节点组元。节点刚体主要用于模拟刚性（焊接）点，在该点不同的柔性组元（有不同的 MAT IDs）作为一个刚体一起运动。因为节点刚体和部件号无关，所以前面讨论的刚体的其他选项（如 EDLOAD 命令施加载荷）不能用于节点刚体。

12.1.9 显式动态分析后处理

可以用 ANSYS 的两种后处理器——POST1 和 POST26 查看 ANSYS/LS – DYNA 结果：用 POST1 查看整个模型在特定时刻点的结果或动画结果，用 POST26 查看一段时间内指定 Component 在很多时间点的结果。显式动态分析中需要查看的一般是动画结果（POST1）和时间历程结果（POST26）。

注意：有经验的 LS – DYNA 用户也可以用 LSTC 后处理器 LS – POST，但是 ANSYS 不支持这种处理器。

1. 输出控制

(1）结果文件（Jobname、RST）与时间历程文件（Jobname. HIS）的比较。

后处理中所使用的结果取决于用 EDRST 和 EDHTIME 命令（Main Menu > Solution > Output Controls > File Output Freq）写入到 Jobname. RST 和 Jobname. HIS 文件的信息。

注意 Jobname. RST 和 Jobname. HIS 的区别：Jobname. RST 文件主要用于 POST1 后处理器，包括整个模型的求解，但是捕捉的时间点相对较少。一般来说，Jobname. RST 文件包含有足够的信息以形成动画。相对来说，在 POST26 中使用的 Jobname. HIS 文件包括较多的时间点上的结果，但它仅限于模型的一部分（要得到整个模型在较多时刻的结果将很快充满硬盘空间）。相比较而言，Jobname. RST 文件中的时间步通常小于 100；Jobname. HIS 文件通常是大于 1000 或更多。

注意：ANSYS/LS – DYNA 不支持文件分离。因此，存储在任何文件中的全部数据仅限于系统所允许的最大文件大小。对于大模型，存储在结果文件 Jobname. RST 和 Job-

name. HIS 中的数据可能超过系统的限制。在这种情况下，ANSYS/LS－DYNA 将把数据写入每一个结果文件中直到限制的大小。剩余的数据将不再写入，而存储的最后一个荷载步数据可能是不完全的。而且，如果试图用 SET 命令获得最后一次存储的荷载步数据，系统就会产生错误。为了防止结果文件超出系统限制，应该减少写入到 Jobname. RST 和 Jobname. HIS 的输出量。

（2）生成 POST26 的 Components。

在用 POST26 查看结果前，必须在模型中生成单元或节点 Components。例如，在 PREP7 或 SOLUTION 阶段，选择想查看结果的那部分单元，生成仅含有那些单元的 Component；也可以生成包含一组给定节点的 Component。这些 Components 可通过 GUI 菜单路径生成，或执行下列命令来生成。

```
ESEL,S,MAT,,1          ! 选择材料 1 的单元
CM,elm1,elem           ! 生成单元组件 elm1
NSLE                   ! 选择单元的节点
CM,nod1,node           ! 生成节点组件 nod1
```

应限制单元和节点组件以节省硬盘空间。

（3）为 POST26 记录输出文件。

在用 POST26 查看结果前，必须直接命令 ANSYS/LS－DYNA 把相关的信息写入到 Jobname. HIS 或其他输出文件中去；在 PREP7 或 SOLUTION 阶段，需定义时间步数、要分析的单元和节点 Component 以及记录的 ASCII 码文件。可通过 GUI 菜单路径 MainMenu > Solution > Output Controls）或执行下列命令来给定上述信息。

```
EDHTIME,NSTEPS       ! 定义时间历程结果的时步数
EDHIST,elm1          ! 定义单元 Component 名
EDHIST,nod1          ! 定义节点 Component 名
EDOUT,GLSTAT         ! 写 ASCII 文件 GLSTAT(总的时间步和能量统计)
EDOUT,MATSUM         ! 写 ASCII 文件 MATSUM(每个 PART 的能量信息)
EDOUT,SPCFORC        ! 写 ASCII 文件 SPCFORC(单点约束(反作用)力)
EDOUT,RCFORC         ! 写 ASCII 文件 RCFORC(合成界面力数据)
EDOUT,SLEOUT         ! 写 ASCII 文件 SLEOUT(界面滑移能量)
EDOUT,NODOUT         ! 写 ASCII 文件 NODOUT(节点数据)
EDOUT,RBDOUT         ! 写 ASCII 文件 RBDOUT(刚体数据)
```

注意：如果熟悉 LS－DYNA 程序所产生的所有 ASCII 文件，可用 EDOUT,ALL 命令写出所有可能的 ASCII 文件。

2. 在 ANSYS/LS－DYNA 中使用 POST1

ANSYS 程序的 POST1 操作同样适用于 ANSYS/LS－DYNA 程序，可显示变形形状、等值线、矢量以及结果表格。

当采用 POST1 时，可用 RSYS 命令把应力结果转换到定义的坐标系中。在打印输出、显示或单元列表操作时，就会轮换应力数据。除 BEAM161、COMBI165 和合成单元 SHELL163（KEYOPT(3)＝1）外，RSYS 支持所有显式单元的应力输出。在包括这些单元的模型中使用 RSYS 命令。执行此命令之前，千万不能选择不支持的单元。

注意：任何显式单元的应变数据都不能转换。如果 RSYS 不设置为全局笛卡儿坐标系，

而需要应变结果，将忽略打印或绘图命令。

在 POST1 中显示结果时，将自动去除失效单元。失效单元是指那些超过指定失效准则的单元（例如失效应变）。在某些情况下，由于模型中某时间步一定数量的单元失效，网格连接可能会出现丢失现象。但是，单元仍在所选之列，模型仍按所期望的那样工作（在 LS-DYNA 求解中，单元失效后自动从求解中去除）。

（1）动画效果。

在 POST1 中也可进行动画显示。例如，可以动画显示变形形状的单元中心应力。从 Jobname. RST 文件读入一系列结果后，在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plotctrls > Animate > Over Results 命令，弹出动画对话框，利用其中的 Push 按钮来运行、停止、重新运行以及控制动画显示。

如果以命令流的方式输入，则使用合适的绘图命令（如 PLESOL），然后再运行 ANDATA 命令。

```
PLESOL,Item,Comp
ANDATA
```

这种方法就是读入所有的结果数据，并进行动画显示。对于快速作图，使用 INRES 命令选择结果数据中的特定类型。

```
INRES,Item
```

（2）单元数据输出

POST1 中所使用的结果数据因单元不同而不同。每一种显式动态单元（LINK160、BEAM161、SHELL163、SOLID164、COMBI165、PLANE162、MASS166、LINK167）的输出数据，都在《ANSYS Elements Reference》中有完整的描述。

以下是有关显式动态单元应注意的事项。

- 对于 SOLID164 单元，不论使用 1 个或 8 个积分点（KEYOPT（1）），应力应变结果只储存单元中心的。
- 对于 BEAM161 和 SHELL163 单元，不论使用缩减还是多个积分点，储存应力应变结果仅在每个单元的中心（壳单元的每一层）。
- 对于 BEAM161 和 SHELL163 单元，必须给定 ANSYS/LS-DYNA 计算的积分点数（采用实常数）和存储结果数据的积分点数（采用 EDINT 命令）。默认时，壳单元高斯积分点数为 2。对于高斯积分法，可定义到 5 个点（层壳）。超过 5 层，需要用梯形积分法或用户自定义积分法（注意，对于少于 20 个积分点的情况，尤其是弯曲，不推荐使用梯形积分法）。默认时，对于壳单元，用 EDINT,SHELLIP 定义的层数为 3。如果 NIP（通过单元厚度的积分点数值）=2，底层的结果和积分点 1 相对应，顶层的结果和积分点 2 相对应，中间的结果为顶层和底层的平均值。对于梁单元，默认时存储 4 个积分点的结果（在 EDINT 中，BEAMIP =4）。对于作为结果输出的梁单元的描述（KEYOPT(1) =2），不管有没有 BEAMIP 设置，都没有应力输出。如果 BEAMIP =0，对于任何梁单元都没有应力输出。在这种情况下，梁单元将不出现在任何 POST1 的图中，因为程序假设它们为失效单元。
- 当使用 BEAM161 单元时，可用 LAYER,NUM 命令定义想要保存结果的层数。对于

应力数据，层数由最低层开始逐层向上定义。然而，对于应变数据，层 1 是低层，层 2 是顶层，无论存在多少层，应变信息只存储这两层。另外，仅可得到在层中间的数据，而不能得到每层或单元的顶表面或底表面的数据。要得到靠近单元表面的结果，应沿壳单元厚度给定较多的积分点。然而，存储这么多层数据量将变得很庞大。

- SHELL,LOC 命令不影响 SHELL163 单元。默认情况下，在绘制数据曲线（PLNSOL、PLESOL）时只显示顶层输出数据，但在打印结果中将显示最顶层和最低层数据。
- 对于 PLANE162、SHELL163、SOLID164 单元，TOTAL 应变仅是记录的应变（不管单元采用的材料性质，包括弹性材料）。当查看这些单元的塑性应变时（PLESOL、EPPL），也可以显示塑性应变以外的应变。

（3） 自适应网格划分的处理结果

在 ANSYS/LS－DYNA 的大变形分析中，用自适应网格来定义壳单元的网格细分。在分析中包括自适应网格时，随着网格增多与用户定义的单元面比保持一致，模型中单元的数目在求解中也会增多。随着单元数的变化，文件扩展名也会改变来表示一个新的有限元网格。

结果文件的扩展名变化如下。

Jobname. RS01：第 1 次网格划分。

Jobname. RS02：第 2 次网格划分。

Jobname. RS03：第 3 次网格划分。

……

为了在采用自适应网格时处理结果，需定义合适的文件名和扩展名（FILE 命令）来区分特定的时间步。不能恢复原来的模型数据库（. DB file），因为数据库文件中的网格不能和结果文件中的匹配。下面的例子说明了一个典型的后处理过程。

```
/POST1
FILE,Jobname. RS01          ! 指定第一次网格划分的结果文件
SET,LIST                    ! 显示第 1 次网格划分要写入的时间步
SET,1,2                     ! 把结果放在一个特定的时间步内
PRNSOL,…                    ! 打印或显示结果
```

在 RSnn 文件中不存储单元特性。因此，在用这些文件进行后处理时，应小心使用选择逻辑。并且，不能仅用这些文件的信息进行求解，也不能由这些文件存储新的数据库。

由于是多结果文件，当采用自适应网格时不能直接显示整个求解过程的动画。但是，采用 FILE 或/SEG 命令，可以编写一个宏来创建所要的动画。

3. 在 ANSYS/LS－DYNA 中使用 POST26

ANSYS 程序的 POST26 操作也可在 ANSYS/LS－DYNA 中使用。使用 POST26 可得到两种类型的结果：

- 节点和单元求解。
- 混合的输出文件，例如存储在 ASCII 文件（GLSTAT、RCFORC、SLEOUT、MATSUM、SPCFORC、NODOUT 和 RBDOUT）中的各种能量、功和反作用力等

记住，当使用 POST26 查看结果时，必须用 Jobname. HIS 文件存储足够的时间历程数据结果，用 FILE 命令（MainMenu > TimeHistPostpro > Settings > File）将 Jobname. HIS 文件读入

到 POST26 后处理器中。

```
FILE,Jobname. HIS
```

如果不将 Jobname. HIS 文件读入到 POST26，结果数据从 Jobname. HIS 文件读入，将不能为时间历程后处理器提供足够的信息。

（1）节点与单元结果

POST26 处理与时间有关的结果，统称为变量表。每一变量都有一个参考号，变量号 1 给时间预留。要输出结果，就必须通过 GUI 界面定义、绘图或列表显示变量。可通过菜单路径 Main Menu > TimeHist Postpro 或使用以下命令来完成。

- NSOL：从结果文件定义被存储的节点数据。
- ESOL：从结果文件定义被存储的单元数据。
- PLVAR：以图形格式显示数据。
- PRVAR：列表显示变量 – 时间曲线。

单元和节点解的结果可以从 Jobname. HIS 和 Jobname. RST 中得到。必须注意，从 . HIS文件读的数据仅是 EDHIST，NCOMP 给定的 Component 中包括的节点和单元。

为了对 BEAM161 和 SHELL163 单元中不同积分点的结果进行存储和显示，应对每一层使用 LAYERP26（Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variable）和 STORE 命令（Main Menu > TimeHist Postpro > Store Data）。SHELL163 的实例如下：

```
LAYER26,num1         ！定义第 1 层号
ESOL                 ！存储第 1 层单元数据
NSOL                 ！存储第 1 层节点数据
STORE,MERGE          ！存储第 1 层结果数据
LAYERP26,num2        ！定义下一层号
ESOL                 ！存储下一层单元数据
NSOL                 ！存储下一层节点数据
STORE,MERGE          ！存储下一层结果数据(还有第 1 层结果数据)
LAYERP26,numn        ！定义下 n 层号
ESOL                 ！存储下 n 层单元数据
NSOL                           ！存储下 n 层节点数据
STORE,MERGE                    ！存储下 n 层结果数据
PRVAR                          ！图示所有层的结果数据
```

对于每一层都必须使用 STORE,MERGE 命令，否则只能得到最后一层的数据。

（2）读入其他输出数据的 ASC 文件

查看写入 GLSTAT、MATSUM、SPCFORC、RCFORC、SLEOUT、NODOUT 和 RBDOUT 文件的信息，应首先执行 FILE,Jobname. HIS（Main Menu > TimeHist Postpro > Settings > File）来获得时间信息，然后执行 EDREAD 命令（Main Menu > TimeHist Postpro > Read LS-DYNA Data）。在 EDREAD 之后，须执行 STORE（Main Menu > TimeHist Postpro > Store Data）命令把这些数据存储成时间历程变量。存储后，就可以用标准的 POST26 程序分析数据。

（3）数据平滑处理

如果所用数据中存在噪声数据（例如地震激励），可以把它们平滑处理成较少的数据，从而获得比较精确的近似数据点。

处理数据要求4个数组。前两个包括独立和非独立变量的噪声数据；后两个包括处理的数据（在处理后）。处理数据之前，需定义前两个矢量，然后填上噪声数据。如果采用交互模式，ANSYS将自动创建第3个和第4个矢量。如果采用批处理模式，在处理数据前也须创建这些矢量（ANSYS将填充处理后的数据）。

创建这些数组后，就可以用EDNDTSD命令（Main Menu > TimeHist Postpro > Smooth Data）处理这些数据。可以用DATAP域处理全部或部分积分点，也可以在FITPT域选择一个合适的阶数。DATAP域默认为所有点，而FITPT域默认为数据点的一半。为了显示这些结果，可以选择显示未处理的、处理后的数据或两者都显示。

12.1.10 跌落测试模块

1. DTM简介

Drop Test Module（DTM）是ANSYS/LS-DYNA的一个可选的附加模块。DTM大大简化了模拟跌落测试的步骤。跌落测试包括用假定的重力场给物体定向，并且允许其在重力作用下下落一定的高度后到达刚性表面（目标面）。在典型的跌落测试中，物体从某处跌落，目标面位于与重力加速度g垂直的表面上。

DTM提供了一个最新的GUI，可指导进行跌落测试分析。通过它用户可以快速相对于目标面定义模型，定义求解控制，然后执行显式动态测试。跌落模拟分析可在用户定义时间间隔内预测物体的变形和应力，描述物体与目标冲击过程的物理特性。

DTM被专门设计用于ANSYS的GUI环境中，因而即使不熟悉显式动态分析的用户也能很容易进行跌落模拟分析。使用DTM有许多优点，如可自动生成目标面，也可以自动定义初始平移速度和角速度、接触表面摩擦系数以及与g不垂直的目标方向。对于大部分跌落测试来说，可以在冲击前一刻开始分析，以减少计算时间。当使用这一选项时，DTM将自动计算物体的平移速度，并且在分析开始时应用它。所有的跌落测试实例忽略作用在物体上的空气阻力。

2. 类型的跌落分析步骤

典型的跌落测试包括在重力场某高度抛落物体到平面或刚性面（目标面）上，并忽略表面摩擦。这里叙述的基本步骤假设物体初速度为零，并且物体跌落到平面目标上，目标面的法线方向与重力加速度方向垂直。

在开始之前，重要的是了解在DTM内使用什么样的屏幕坐标系。在DTM中，常常定义屏幕坐标系，所以Y轴（竖直）与g方向相反。这样就可以很方便地用屏幕坐标系跟踪跌落物体和重力场的关系轨迹。

在进入DTM之前，必须建立或导入跌落物体的模型。应该定义所有材料特性，包括阻尼。模型中应包括与LS-DYNA兼容的单元。要保证材料的密度或弹性模量不为零，否则不能使用DTM。

为避免时间增量退化问题，建模时应遵循下列原则。

- 避免三角、梯形和棱柱单元。
- 避免小单元。
- 避免尖角单元。
- 尽可能用均匀网格。

推荐施加一定的阻尼，从而减少振荡响应；也可以用EDDAMP命令施加Alpha（质量阻尼）和Beta（刚度阻尼）。完成建模进入DTM前，用一个唯一的名称保存当前数据库（菜单路径：Utility Menu > File > Save As）。

采用Main Menu > Drop Test > Set Up命令，弹出Drop TestSet - up对话框。该对话框中含有多个选项卡，大部分普通跌落测试参数位于Basic选项卡内，偶尔需要修改的参数都包含在其他选项卡内。

- Basic选项卡：定义重力加速度的大小、物体跌落高度、物体定向、分析开始时间、撞击后的运行时间，以及输出结果文件和时间历程文件的频率。
- Velocity选项卡：定义物体的初始线/角速度。
- Target选项卡：定义目标面的尺寸和材料特性、定向角度，以及目标的接触和摩擦特性。
- Status选项卡：显示重力加速度、初始平移/角速度以及求解。

当Drop Test Set - up对话框出现时，单击OK按钮或Cancel按钮后才可以选择其他菜单的命令。

① 查看所有表内的信息。

② 选择Status选项卡，显示大部分更新的输入数据。

③ 在ANSYS图形窗口中查看物体和目标。

如果选择Status选项卡，ANSYS会尝试自动生成目标面（除非已经通过Target表创建了目标）。如果以黑色字体在Status选项卡末尾显示信息，表示可接受设置的所有数据，并且可以求解分析；如果是黄色字体，则用户应该小心，因为数据产生错误；如果出现红色线框，则表示这些数据不能接受。

如果收到上述第2种或第3种信息，那么可在ANSYS输出窗口检查它们。如果需要修改，可以单击OK按钮。此时所有的标准ANSYS菜单不能再使用。然后选择MainMenu > DropTest > Solve命令，开始LS - DYNA求解。ANSYS/LS - DYNA DTM当前版本存储的数据和以前的不兼容。

求解完成后，可以选择Main Menu > Drop Test > Animate Results命令来显示分析持续时间内跌落物体的动画结果（例如VonMises应变）。对于动画结果，推荐用户在跌落时刻开始分析。

除了显示动画结果外，在GUI界面中选择Main Menu > Drop Test > Time History命令，可以在指定点查看结果（这一结果为时间的函数）。

3. 屏幕坐标的定义

当第一次进入DTM时，固定的屏幕笛卡尔坐标系自动定义，并在ANSYS图形窗口的左下角表示出来。用屏幕坐标系可以很方便地跟踪持续下落物体和引力场的关系轨迹。关于屏幕坐标系有两点需要了解：

- 在DTM中，屏幕坐标系的Y轴总是与重力加速度g的方向相反。
- 物体坐标可以随屏幕坐标旋转。

屏幕坐标总要定义，以便Y轴在屏幕up方向。物体坐标系是有限元模型定义的坐标系统。可以用DTM旋转工具重新定义物体坐标系。拾取物体上的两个节点可以定义与屏幕Y坐标平行的矢量。通过重新定义物体Y向，可以定义物体和引力间的关系，因为常常假设Y

方向在 up 或与重力加速度的方向相反。

屏幕坐标也可以确定跌落测试的默认观察方向。定义如下。

- 屏幕 X 方向是“右”。
- 屏幕 Y 方向是“上”。
- 屏幕 Z 方向是从屏幕到观察者的方向，或 out。

4. 使用 DTM 的其他注意事项

- 在初始化中，生成与过滤 DTM 中菜单拾取相关的关键词。关键词是 DTFILT，应避免把它作为关键词或参数名，因为它可能干涉菜单选项的过滤。
- 在 DTM 内，自动生成包含物体内所有节点的分量，并且命名为_dtdrPOb。这一分量名称用于执行 LS－DYNA 的相关命令，应避免使用该名称。
- 参数_dtcgnum 和_dtlownum 用于时间历程处理器的绘图和显示。
- DTM 假设在跌落物体上没有约束，但是允许物体内分量间的耦合。
- DTM 内使用的一些参数名是以下画线开头的，所以应避免使用以下画线开头的参数名称。
- 如果不给物体定义方向，默认假设是当前屏幕的 Y 轴方向和重力加速度方向相反。
- 在进入求解阶段前，可多次修改任意输入的参数。DTM 中所有参数都可以重新定义。可以发现，当影响初始目标/物体方向的输入参数改变时，只要选择 Target 选项卡或 Status 选项卡，目标面将自动更新生成来反映这一变化。
- 定义跌落高度后，通过默认值可以注意到目标面几乎和物体接触，这是由于默认选项，在撞击时刻附近开始分析。物体和物体之间仅有一点距离就生成目标面。可能想调整 Solution Time 选项在跌落时刻开始分析，之后将会发现重新定义的目标面与指定的跌落高度在同样的位置。但是，当该选项提供跌落过程的完全动画显示时，将需要更多的 CPU 时间。
- 用这一选项在撞击时刻附近开始分析，必须设定初始角速度为 0。
- DTM 不改变物体的模型，指定新的物体方向后，DTM 将生成新的目标模型。

12.2 锤击法施工分析实例

ANSYS 显式动态分析可以很好地用于非线性模型、大变形问题，特别对于岩土工程问题有良好的适应能力。

12.2.1 问题背景

桩基础是一种承载能力高、稳定性好、沉降及差异变形小、地基沉降稳定快、抗震能力强及能适应各种复杂地质条件的基础形式，在当前得到广泛应用。

在各种沉桩方法中，锤击法是最为常用的一种。锤击法的施工原理是利用桩锤的冲击克服土壤对桩的阻力，使桩端沉至预定设计深度或到达地基持力层。本例将对锤击过程中桩锤冲击之后的动力过程及桩的动态应力场分布进行分析。

12.2.2 分析过程

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，弹出 170：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中设置 Simulation Environment、Lisence、Working Divectory 和 Job name（项目名称），选中右上角的 LS－DYNA（－DNY）复选框，单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。

（2）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preferences 命令，在弹出的图 12-6 所示 Preferences for GUI Filtering 对话框选中 LS－DYNA Explicit 复选框，单击 OK 按钮，完成分析环境设置。

（3）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，弹出图 12-7 所示的 Element Types 对话框。单击 Add 按钮，在弹出的图 12-8 所示 Library of Element Types 对话框中选择单元类型为 LS－DYNA Explicit > 3D SOLID 164，单击 OK 按钮。

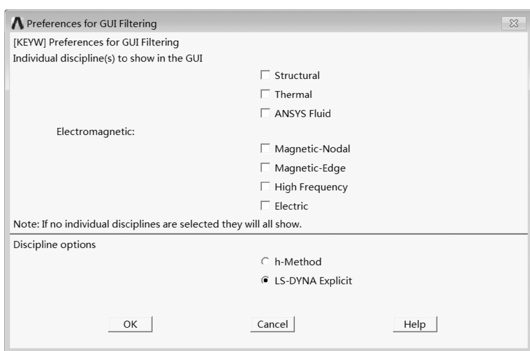


图 12-6　Preferences for GUI Filtering 对话框

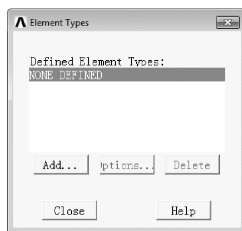


图 12-7　Element Types 对话框

（4）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出图 12-9 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。在右侧的 Material Models Available 列表框中依次双击 LS－DYNA > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的图 12-10 所示 Linear Isotropic Properties for Material Number1 对话框中设置 DENS = 2500、EX = 2.7E + 010、NUXY = 0.2、DENS = 2500，单击 OK 按钮。

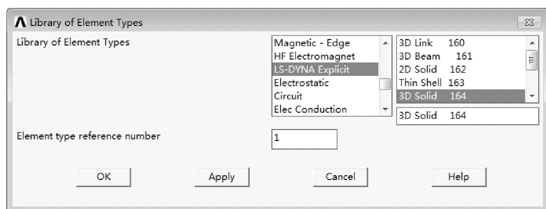


图 12-8　Library of Element Types 对话框

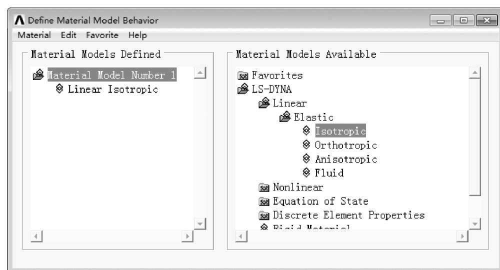


图 12-9　Define Material Model Behavior 对话框

（5）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By Dimensions 命令，弹出 Create Block by Dimensions 对话框，输入几何参数如图 12-11 所示，单击 OK 按钮。

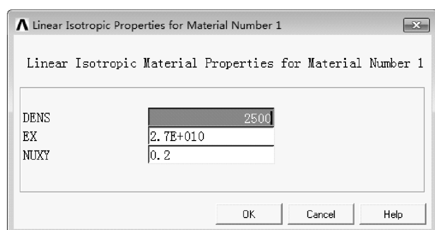


图 12-10 Linear Isotropic Properties for Material Number1 对话框

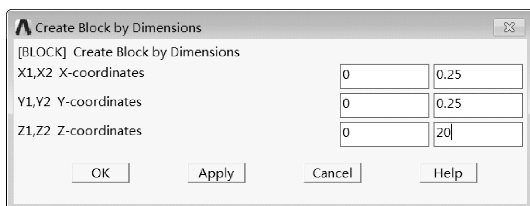


图 12-11 Create Block by Dimensions 对话框

生成图 12-11 所示的桩体几何模型。旋转模型，就可以看到完整的桩体，如图 12-13 所示。

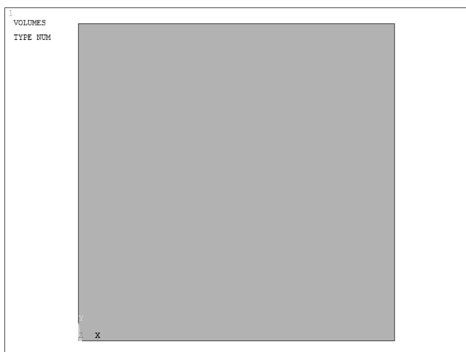


图 12-12 生成模型

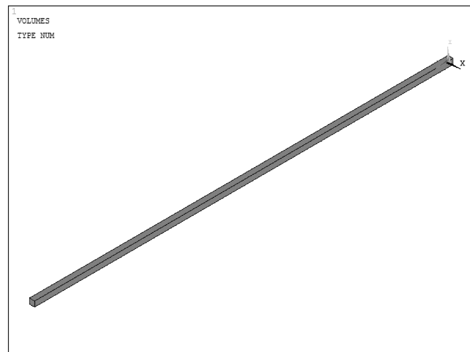


图 12-13 完整模型

（6）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Volumes 命令，弹出 Volume Attributes 对话框，设置如图 12-14 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Global > Size 命令，在弹出的图 12-15 所示 Global Element Sizes 对话框中设置单元边长为 0.05，单击 OK 按钮。

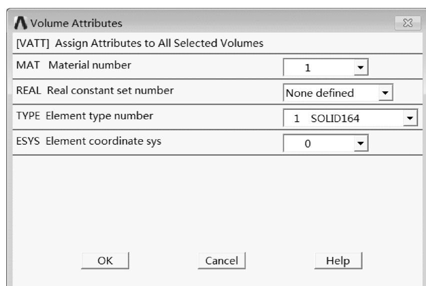


图 12-14 Volume Attributes 对话框

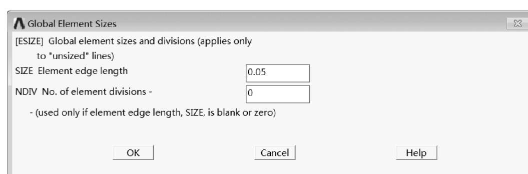


图 12-15 Global Element Sizes 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volumes > Mapped > 4 to 6 sided 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，完成划分后如图 12-16 和图 12-17 所示。

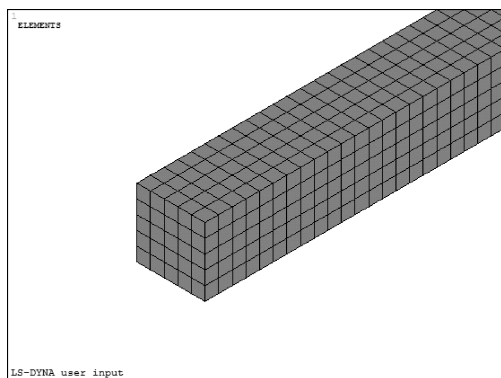


图 12-16 单元细节

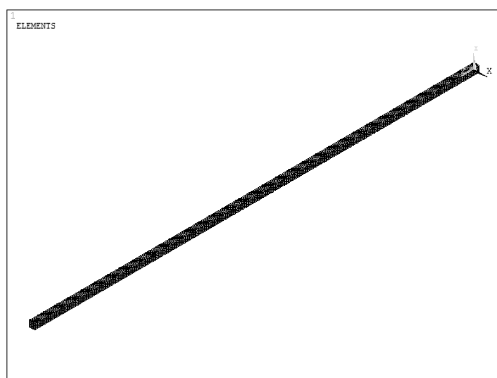


图 12-17 单元

（7）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，通过弹出的 Select Entities 对话框选择 Z = -0.01 至 Z =0.01 之间的节点，如图 12-18 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > LS - DYNA Options > Constraints > Apply > On Nodes 命令或 Main Menu > Solution > Constraints > Apply > On Nodes 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，弹出图 12-19 所示的 Apply U，ROT on Nodes 对话框。选择要约束的自由度为 All DOF，单击 OK 按钮，完成约束后如图 12-20 所示。

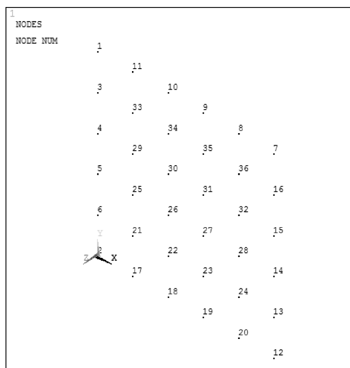


图 12-18 选出的节点

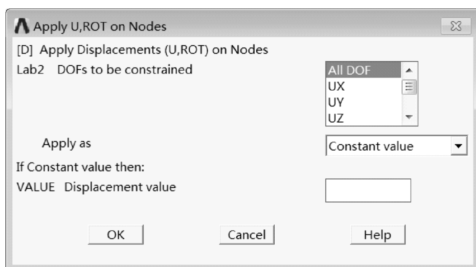


图 12-19 Apply U，ROT on Nodes 对话框

（8）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit，弹出图 12-21所示的 Array Parameters 对话框。单击 Add 按钮，弹出 Array Parameter TIME 对话框，定义图 12-22 所示的数组。

重复上述操作，请读者自己动手定义如图 12 -23 所示的数组 FORCE。

（9）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，通过弹出的 Select Entities 对话框选出 Z =19.99 至 Z =20.01 之间的节点。选出的节点如图 12-24 所示。

再将 Select Entities 对话框切换至选择单元，选择方式为 Attached to，选出与上一步选出节点相关的单元，如图 12-25 所示。

（10）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Comp/Assembly > Create Component 命令，弹出图 12-26 所示的 Create Componet 对话框，输入元件名称 LOAD，选择要组合的对象为 Elements，单击 OK 按钮。

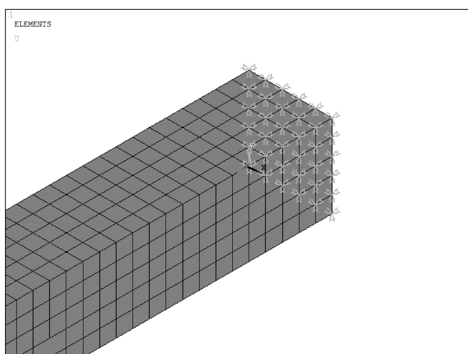


图 12-20　定义约束

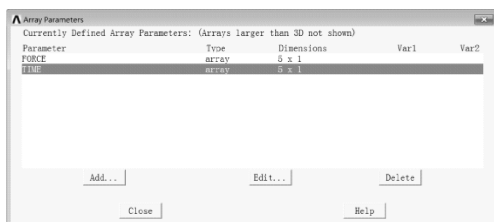


图 12-21　Array Parameters 对话框

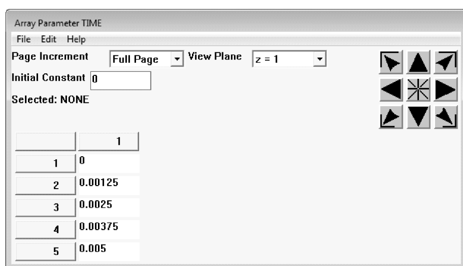


图 12-22　Array Parameter TIME 对话框

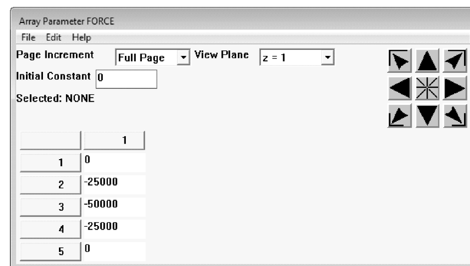


图 12-23　定义数组

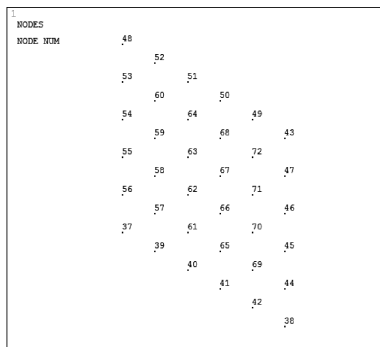


图 12-24　选出节点

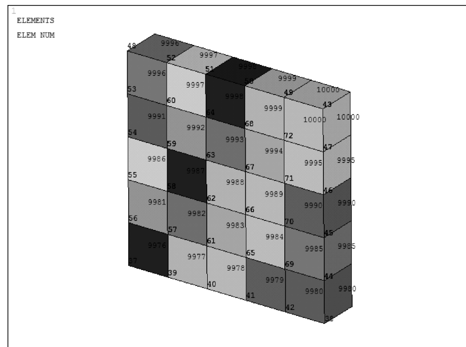


图 12-25　选出的单元

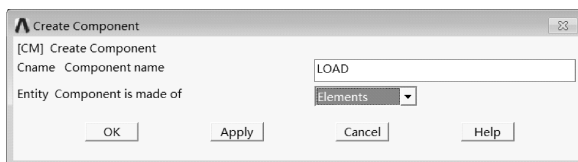


图 12-26　Create Componet 对话框

（11）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > LS－DYNA Options > Loading Options > Specify Loads 或 Main Menu > Solution > Loading Options > Specify Loads 命令，弹出 Specify Loads for LS－DYNA Explicit 对话框，设置施加的荷载为 PRES，加载对象为 LOAD，时间数组为 TIME，荷载数组为 FORCE，如图 12－27 所示。

单击 OK 按钮，完成定义的显式动态荷载如图 12-28 所示。

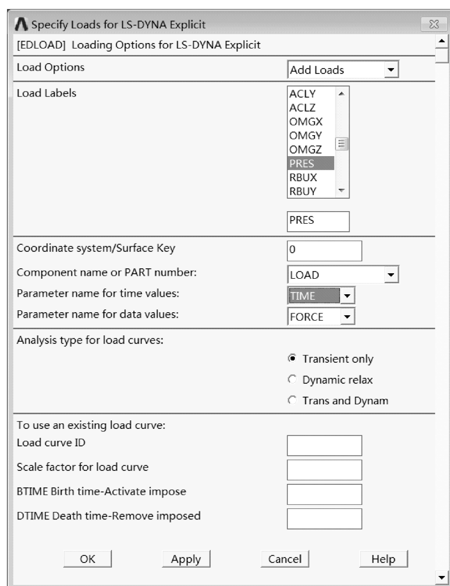


图 12-27　Specify Loads for LS－DYNA Explicit 对话框

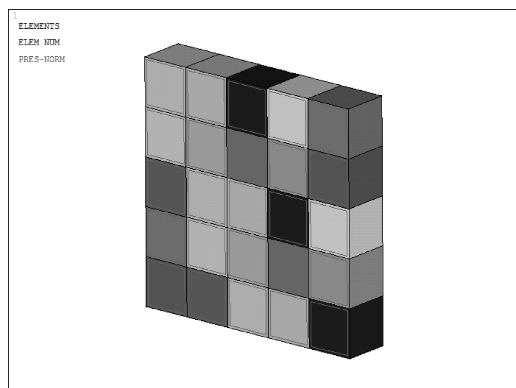


图 12-28　施加荷载

（12）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Everything 命令，显示完成的模型，如图 12-29所示。

（13）完成模型建立后，开始设置求解参数。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Time Controls > Solution Time 命令，弹出图 12-30 所示的 Solution Time for LS－DYNA Explicit 对话框，设置求解时间为 0. 015，单击 OK 按钮。

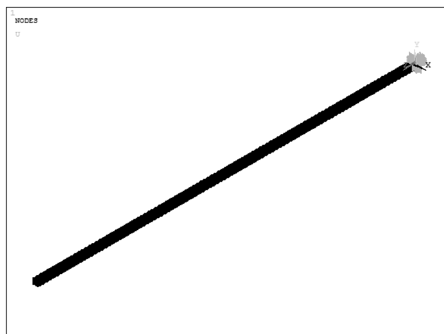


图 12-29　完成模型建立

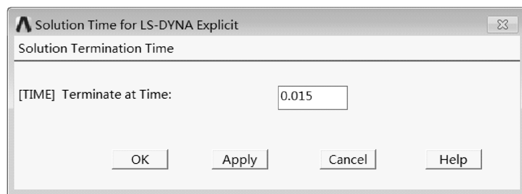


图 12-30　Solution Time for LS－DYNA Explicit 对话框

（14）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Output Controls > File Output Freq > Number of Steps 命令，弹出图 12-31 所示的 Specify File Output Frequency 对话框，设置输入的步数为 100，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Output Controls > Output File Types 命令，弹出 Specify Output File Types for LS－DYNA Solver 对话框，设置如图 12-32 所示，单击 OK 按钮。

（15）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve 命令，在弹出的对话框中单击 OK 按钮，开始求解。

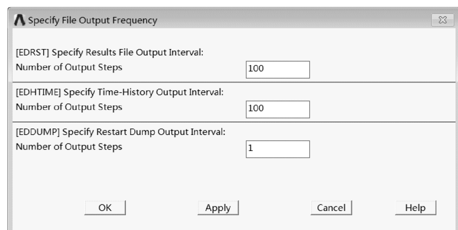


图 12-31　Specify File Output Frequency 对话框

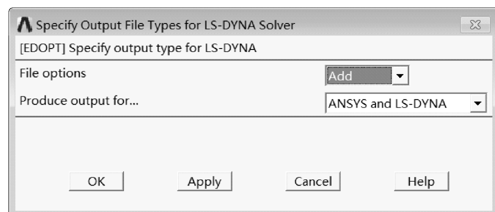


图 12-32　设置输出文件类型

（16）完成求解后，就可以像常规的 ANSYS 后处理一样查看结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > First Set 命令，读入第 1 步的结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 12-33 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择位移矢量和，单击 OK 按钮，显示初始位移云图，如图 12-34 所示。

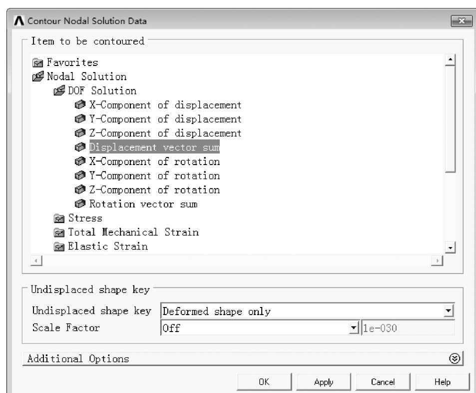


图 12-33　Contour Nodal Solution Data 对话框



图 12-34　初始位移云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > Next Set 命令，依次读取其后 4 阶结果，显示各时期位移云图，如图 12-35 ~ 图 12-38 所示。

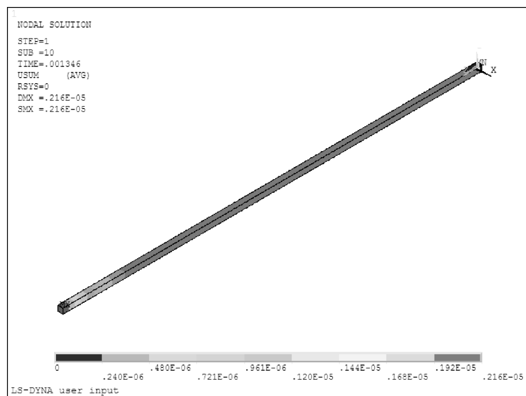


图 12-35　第 10 步位移云图

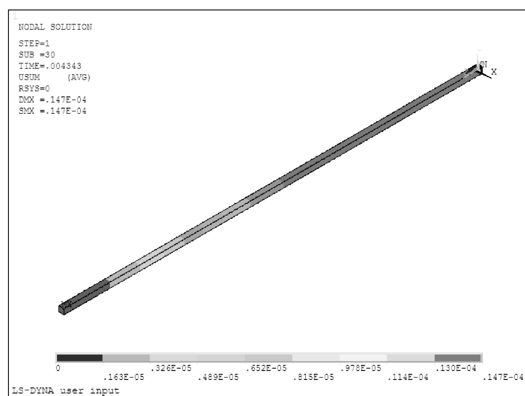


图 12-36　第 30 步位移云图

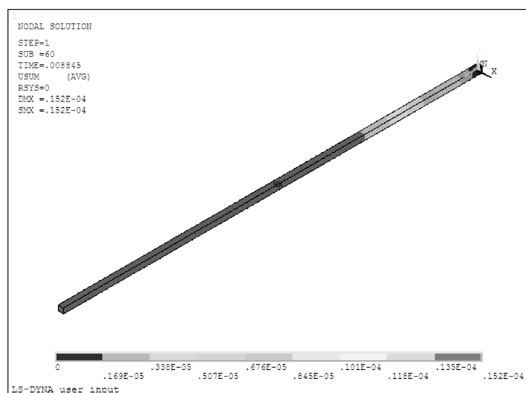


图 12-37　第 60 步位移云图

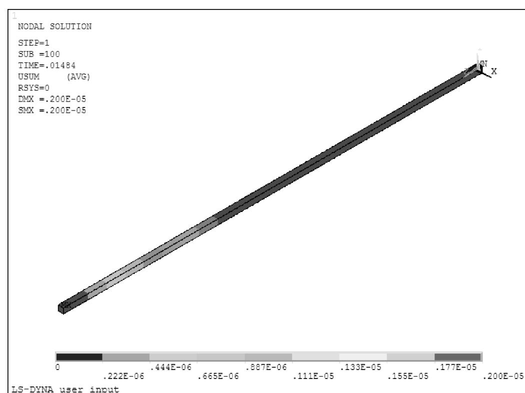


图 12-38　第 100 步位移云图

（17）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 12-39 所示的对话框。选择第 1 主应力，单击 OK 按钮，显示初始应力云图，如图 12-40 所示。

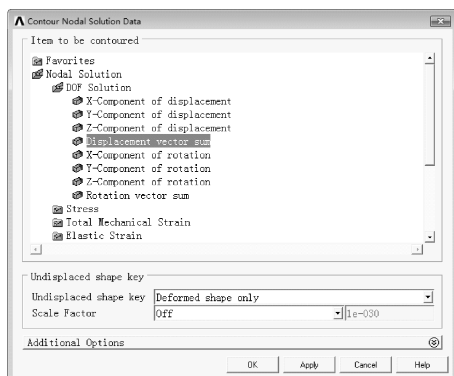


图 12-39　Contour Nodal Solution Data 对话框

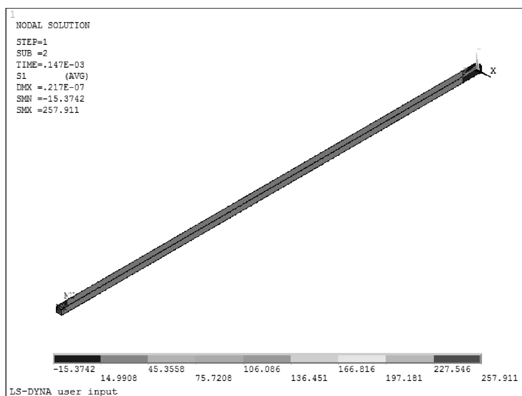


图 12-40　初始应力云图

依次读取其后各阶结果，显示各时期应力云图，如图 12-41 ~ 图 12-44 所示。

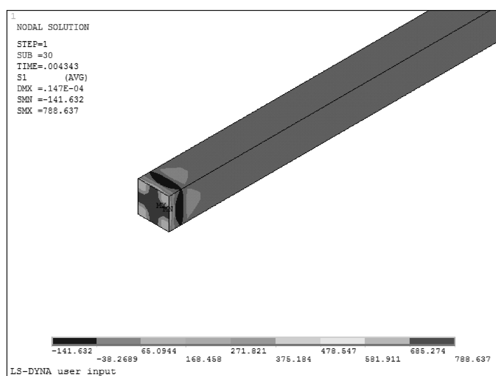


图 12-41　第 30 子步应力云图

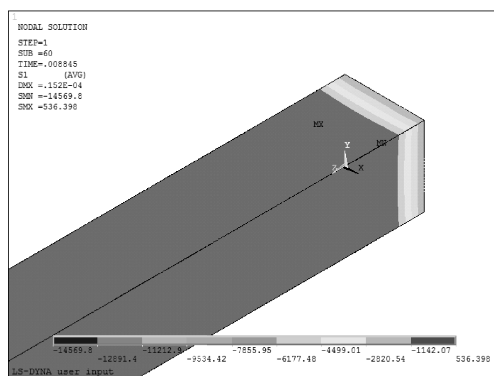


图 12-42　第 60 子步应力云图

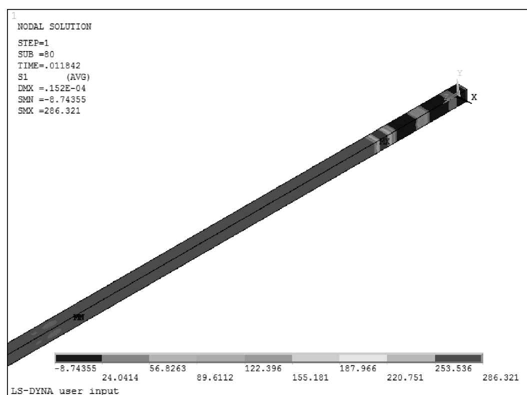


图 12-43 第 80 子步应力云图

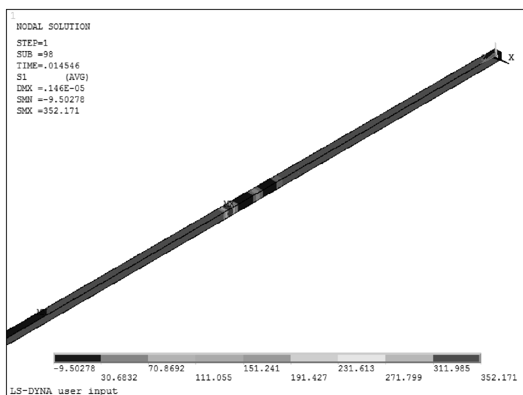


图 12-44 第 100 子步应力云图

（18）单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出 Exit 对话框。选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS。

12.3 本章小结

显式动态分析（ANSYS 的 LS－DYNA 模块）是相对于 ANSYS 标准的隐式动力学分析而言的。显式动态分析主要用于模拟非常大的变形，其中惯性力占支配地位，并考虑所有的非线性行为。

进行显式动态分析时，用户需要注意的是，启动时要加载 LS－DYNA 模块，设置单元类型时必须选用 LS－DYNA 单元，需要考虑所有的非线性行为，进行求解配置时要考虑是否使用 ANSYS 的隐式后处理器。

显式动态分析的基本过程与常用的 ANSYS 隐式分析类似，主要分为建模、加载、求解、后处理。用户不必担心操作不适应的问题。

显式动态分析有专用的单元，主要是 LINK160（显式三维杆单元）、BEAM161（显式三维梁单元）、SHELL163（显式结构薄壳）、SOLID164（显式三维结构实体）、PLANE162（显式二维实体）、COMBI165（显式弹簧－阻尼单元）、MASS166（显式三维结构质量）、LINK167（显式承拉杆单元）等。进行显式动态分析的应选用这些单元。

进行操作之前，建议将 Preference 选项设置为 LS－DYNA Explicit，过滤掉杂项。

施加荷载时，显式动态分析中的所有荷载必须与时间有关。这一点与隐式分析不同，需要注意。

本章为读者提供了一个显式动态分析的实例，用户根据这个例子，可以举一反三，学习分析过程，在今后遇到需要进行显式动态分析时可以灵活运用相关技能。

第 13 章 起重机综合分析

门式起重机是桥式起重机的一种变形，又称龙门节，主要用于室外的货场、料场贸物的装卸作业。其金属结构类似门形框架，承载主梁下安装两条支腿，可以直接在地面的轨道上行走。主梁两端可以安装外伸悬臂梁。门式起重机具有场地利用率高、作业范围大、适应面广、通用性强等特点，在港口货场得到广泛使用。

本章学习目标

- 掌握进行综合分析的方法
- 掌握接触分析的方法
- 掌握时间历程分析的方法
- 掌握移动荷载的使用方法
- 掌握 APDL 编程的方法

13.1 实例背景

图 13-1 所示为工程中应用的门式起重机。

按门框结构形式，门式起重机分为普通门式起重机和悬臂门式起重机。

（1）普通门式起重机：分为全门式起重机和半门式起重机。

- 全门式起重机：主梁无悬伸，小车在主跨度内进行。
- 半门式起重机：支腿有高低差，可根据使用场地的土建要求而定。

（2）悬臂门式起重机：分为双悬臂门式起重机、单悬臂门式起重机。

- 双悬臂门式起重机：最常见的一种结构形式，其结构的受力和场地面积的有效利用都是合理的。
- 单悬臂门式起重机：这种结构形式往往是因场地的限制而被选用。



图 13-1 门式起重机

按主梁形式，门式起重机分为单主梁门式起重机与双主梁门式起重机。

（1）单主梁门式起重机结构简单，制造、安装方便，自身质量小，主梁多为偏轨箱形架结构。与双主梁门式起重机相比，整体刚度要弱一些。因此，当起重量 Q≤50 t、跨度 S≤35 m 时，可采用这种形式。单主梁门式起重机支腿有 L 型和 C 型两种形式。L 型的制造、安

装方便、受力情况好、自身质量较小，但是吊运货物通过支腿处的空间相对小一些。C型的支腿做成倾斜或弯曲形，目的在于有较大的横向空间，以使货物顺利通过支腿。

（2）双主梁门式起重机承载能力强、跨度大、整体稳定性好、品种多，但自身质量与相同起重量的单主梁门式起重机相比要大些，造价也较高。根据主梁结构不同，又可分为箱形梁和桁架梁两种形式。目前一般多采用箱形梁结构。

按主梁结构，门式起重机分为桁架梁门式起重机、箱梁门式起重机、蜂窝梁门式起重机。

（1）桁架梁：使用角钢或工字钢焊接而成的结构形式，优点是造价低、自重轻、抗风性好；但是由于焊接点多和桁架自身的缺陷，桁架梁也具有挠度大、刚度小、可靠性相对较低、需要频繁检测焊点等缺点。适用于对安全要求较低、起重量较小的场地。

（2）箱梁：使用钢板焊接成箱形结构，具有安全性高、刚度大等特点。一般用于大吨位及超大吨位的门式起重机。箱梁同时也具有造价高，自重大，抗风性较差等缺点。

（3）蜂窝梁：一般指“等腰三角形蜂窝梁”，主梁端面为三角形，两侧斜腹上有蜂窝孔，上下部有弦杆。蜂窝梁吸收了桁架梁和箱梁的特点，较桁架梁具有较大的刚度、较小的挠度，可靠性也较高；但是由于采用钢板焊接，自重和造价也比桁架梁稍高。适用于使用频繁或起重量大的场地。由于这种梁型为专利产品，因此生产厂家较少。

13.2 分析过程

本节将为读者详细讲述起重机的综合分析过程。本例的分析过程以GUI界面操作为主，少量涉及APDL命令流（在本书附赠网盘中给出了本例完整的命令流，供读者参考。读者应尽量尝试自己动手编写命令流，与此进行对比）。

13.2.1 静力学分析

（1）启动Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher窗口中分别设置Simulation Environment、Lisence、Working Directory（工作目录）和Job Name（项目名称），单击Run按钮，进入GUI界面。

（2）在GUI界面中选择Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters命令，在弹出的Scalar Parameters对话框中定义表13-1所示参数。

表13-1 定义参数

参数名称	值	参数名称	值
B	40	L_H	40
H	15	B_H	2
L	120	H_H	2
L_S	20	L_KZ	80
L_S_1	10	H_KZ	4
H_S_1	4	B_KZ	2
B_S_1	2	L_ZC	15
L_S_2	10	HS_ZC	4
H_S_2	2	B_ZC	2
B_S_2	2	L_KJ	40

（续）

参数名称	值	参数名称	值
U_L	0. 3	H_KJ	4
DENS_L	7800	B_KJ	2
T	0. 5	E_L	2. 10E + 10

完成定义的参数如图 13-2 所示。

（3）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，弹出图 13-3 所示的 Library of Element Types 对话框，选择单元类型为 SHELL > 3D 4node 181（即 SHELL），单击 OK 按钮。

（4）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出图 13-4 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择材料模型为 Structural > Linear > Elastic > Zsotropic（线性、弹性各向同性模型）。

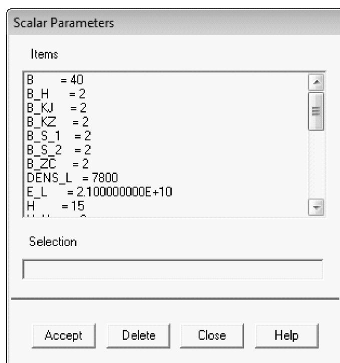


图 13-2　Scalar Paramters 对话框

弹出的 Linear Isotropic properties for Material Number1 对话框，输入材料参数如图 13-5 所示，单击 OK 按钮。回到图 13-4 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择 Density（密度）。弹出 Density for Material Number1 对话框，输入密度参数如图 13-6 所示，单击 OK 按钮，完成材料模型的定义。

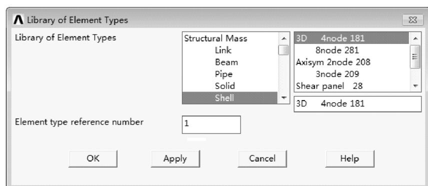


图 13-3　Library of Element Types 对话框

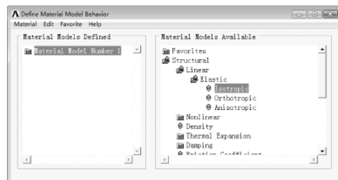


图 13-4　Define Material Model Behavior 对话框

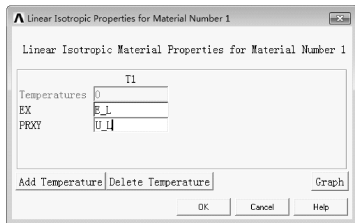


图 13-5　材料 1 线性、弹性参数设置

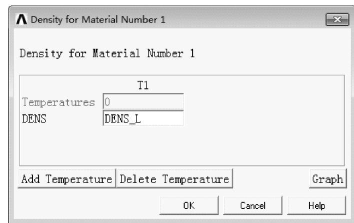


图 13-6　材料 1 密度设置

（5）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Shell > Lay – up > Add / Edit 命令，弹出图 13-7 所示的 Create and Modify Shell Sections 对话框，输入厚度 T，单击 OK 按钮，完成壳单元厚度的定义。

（6）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS 命令，弹出图 13-8 所示的 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。按照表 13-2 所示输入 1 号关键点的编号与坐标，单击 Apply 按钮。继续定义关键点，直到完成表 13-2 列出的全部关键点的定义，结果如图 13-9 所示。

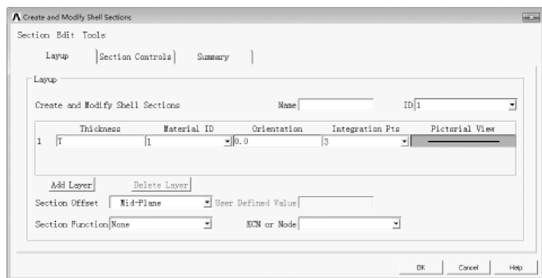


图 13-7 Create and Modify Shell Sections 对话框

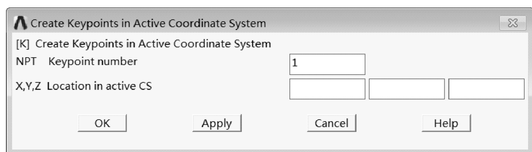


图 13-8 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

表 13-2 关键点列表

关键点号	X	Y	Z
1	0	H + H_KZ/2	– B/2 + B_KZ/2
2	0	H + H_KZ/2	– B/2 – B_KZ/2
3	0	H – H_KZ/2	– B/2 – B_KZ/2
4	0	H – H_KZ/2	– B/2 + B_KZ/2

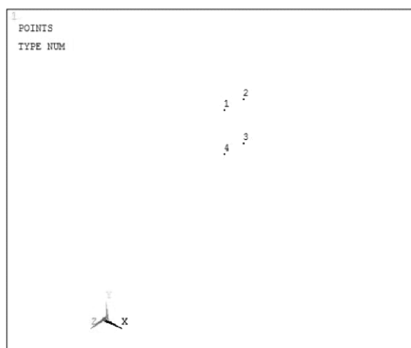


图 13-9 定义关键点

（7）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Keypoints 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，弹出图 13-10 所示的 Copy Keypoints 对话框。设置 DX X – offset in active CS（平移距离）为 L_KZ/2，KINC Keypoint increment（编号增量）为 100，单击 OK 按钮，生成新的关键点，如图 13-11 所示。

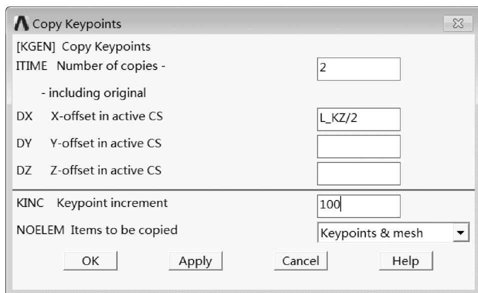


图 13-10 Copy Keypoints 对话框

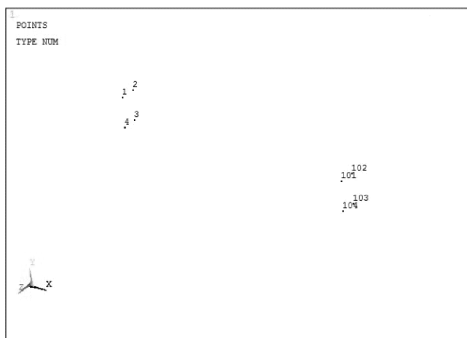


图 13-11 复制 1、2、3、4 号关键点

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Keypoints 命令，拾取 103、104 号关键点然后单击 Apply 按钮。在弹出的如图 13-12 所示 Copy Keypoints 对话框中，设置 DX X – offset in active CS（平移距离）为 – B_ZC/2，单击 OK 按钮生成新的关键点，如图 13-13 所示。

重复上述操作，复制对象仍为 103、104 号点，设置 DX X – offset in active CS（平移距离）为 B_ZC/2，再次复制后的结果如图 13-14 所示。

图 13-12　Copy Keypoints 对话框

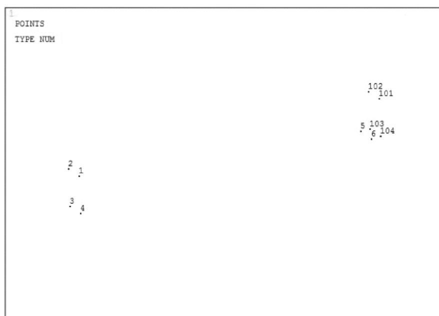


图 13-13　复制 103、104 号关键关键点

请读者自行动手操作，完成 1、2、3、4 关键点的再次复制设置 DX X－offset in active CS（平移距离）为 L_KZ/2＋L_S_1，KINC Keypoint increment（编号增量）为 200），结果如图 13-15 所示。

图 13-14　再次复制 103、104 号关键点

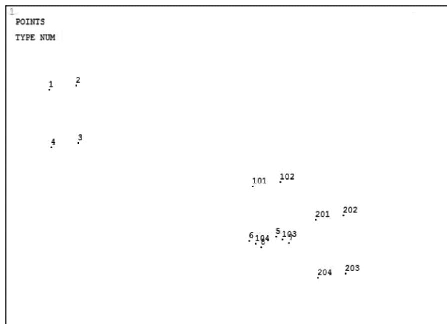


图 13-15　复制 1～4 号关键点

（9）在 GUI 界面中选择 Main Menu＞Preprocessor＞Modeling＞Create＞Keypoints＞In Active CS 命令，弹出图 13-16 所示的 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。按照表 13-3 所示输入 1 号关键点的编号与坐标，单击 Apply 按钮。继续定义关键点，直到完成表 13-3列出的全部关键点的定义，结果如图 13-17 所示。

表 13-3　关键点列表

关键点号	X	Y	Z
301	L/2＋B_H/2	H＋H_KZ/2	－B/2＋B_KZ/2
302	L/2＋B_H/2	H＋H_KZ/2	－B/2－B_KZ/2
303	L/2＋B_H/2	H＋H_KZ/2－H_H	－B/2－B_KZ/2
304	L/2＋B_H/2	H＋H_KZ/2－H_H	－B/2＋B_KZ/2

图 13-16　Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

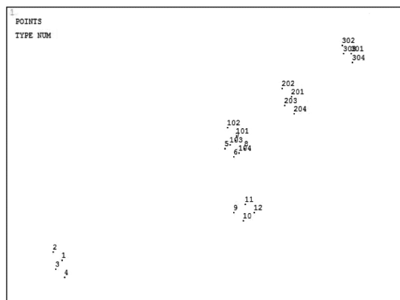


图 13-17　定义关键点

（10）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Keypoints 命令，拾取 5、6、7、8 号关键点并单击 Apply 按钮，弹出图 13-18 所示的 Copy Keypoints 对话框，设置 DY Y - offset in activecs（平移距离）为 - L_ZC，单击 OK 按钮，生成新的关键点如图 13-19 所示。

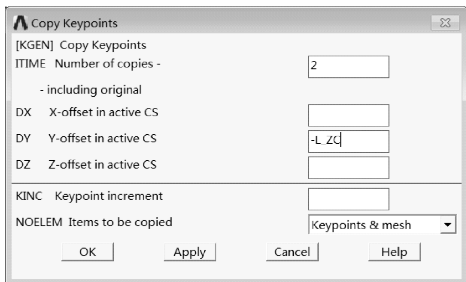


图 13-18 Copy Keypoints 对话框



图 13-19 复制 5 ~ 8 号关键点

（11）重复上一步操作，对表 13-4 所示关键点进行复制操作，完成后如图 13-20 所示。

表 13-4 需要复制的关键点

关键点	偏移量	关键点	偏移量
302、303	X = B_H	9、11	Y = - H_KJ
13、14	Z = L_H/2 + B_KZ	19、20	Z = L_H/2 + B_KZ
15、16	X = - B_H	21、22	Y = H_KJ

（12）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs 命令，按顺序拾取工作区中的 1、2、302、301、1 号节点，单击 OK 按钮，完成面的定义，如图 13-21 所示。

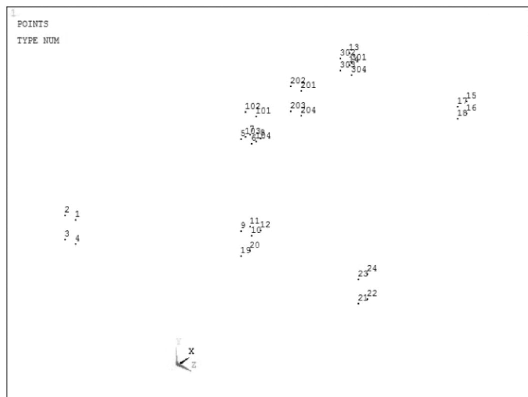


图 13-20 完成复制点

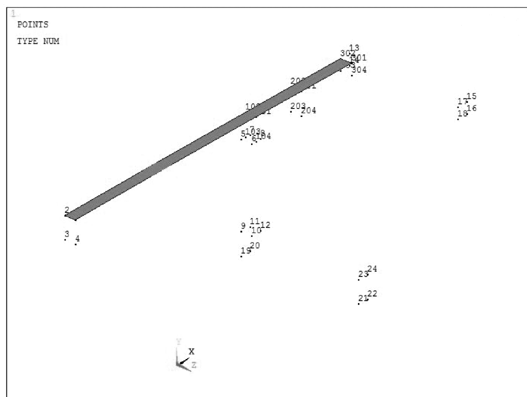


图 13-21 生成第一个面

（13）重复上述通过关键点生成面的操作，将表 13-5 所示的关键点按顺序连接围成面。结果如图 13-22 所示。

表 13-5　围成面的关键点

序　　号	关键点号				
1	2	202	203	3	2
2	202	302	303	203	202
3	201	301	304	204	201
4	201	204	4	1	201
5	6	10	12	8	6
6	8	12	11	7	8
7	7	11	9	5	7
8	6	10	9	5	6
9	3	4	6	5	3
10	203	204	304	303	203
11	302	303	14	13	302
12	201	204	304	301	201
13	13	15	16	14	13
14	302	17	15	13	302
15	301	17	18	304	301
16	303	18	16	14	303
17	9	19	20	11	9
18	11	24	22	20	11
19	20	22	21	19	20
20	21	19	9	23	21
21	10	23	24	12	10

（14）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Areas 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，弹出图 13-23 所示的 Reflect Areas 对话框，设置对称面的法向为 Y－Z Plane X，单击 OK 按钮，完成镜像，如图 13-24 所示。

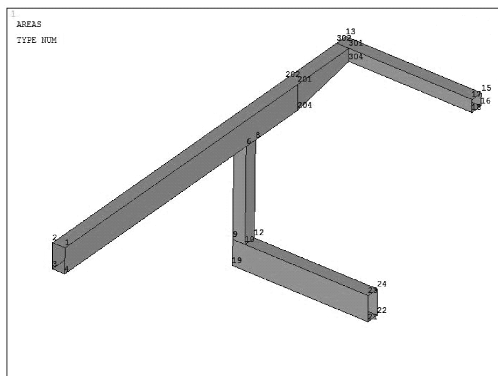


图 13-22　生成面

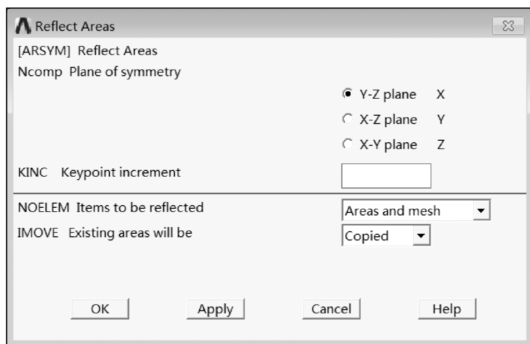


图 13-23　Reflect Areas 对话框

（15）重复上述镜像操作，设置对称面的流向为 X－Y Plane Z（即以 X－Y 平面为准对称），单击 OK 按钮，结果如图 13-25 所示。

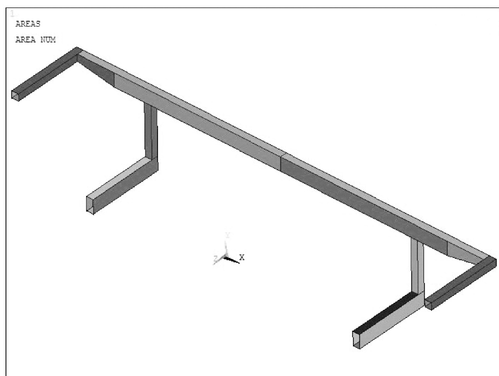


图 13-24　镜像

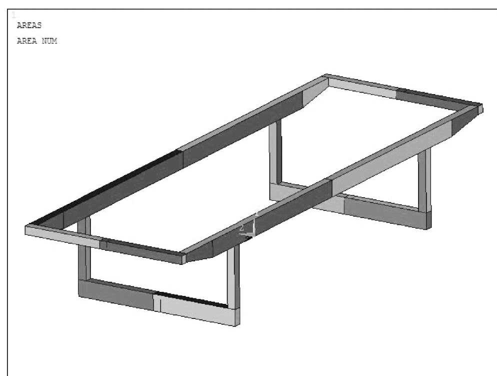


图 13-25　整体模型

（16）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Merge Items 命令，弹出图 13-26 所示的 Merge Coincident of Equivalently Defined Item（合并项目）对话框。选择要合并的项目为关键点，其余保持默认，单击 OK 按钮。

（17）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Global > Size 命令，弹出图 13-27 所示的 Global Element Sizes 对话框，定义单元边长为 1，单击 OK 按钮。

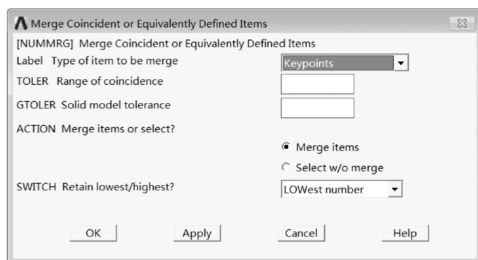


图 13-26　Merge Coincident or Equivalently Defined Item 对话框

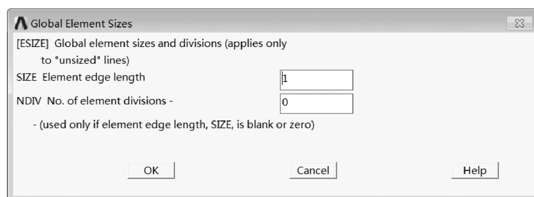


图 13-27　Global Element Sizes 对话框

（18）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 sided 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，完成所有面的划分，如图 13-28 所示。

（19）此时模型建立完毕。图 13-29 所示为显示单元厚度的模型，箱梁的细节如图 13-30 所示。

（20）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，弹出图 13-31 所示的 Select Entities 对话框。设置选择对象为 Areas，选择方式为 From Full，单击 Apply 按钮，弹出图 13-32 所示的 Select Areas 对话框。

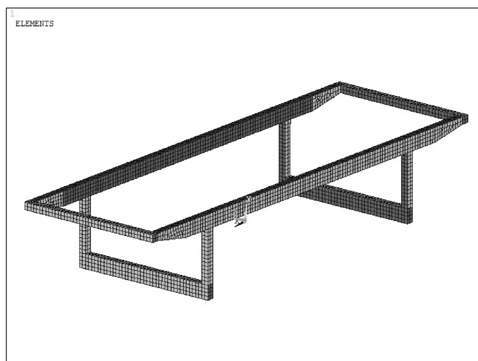


图 13-28　完成单元划分

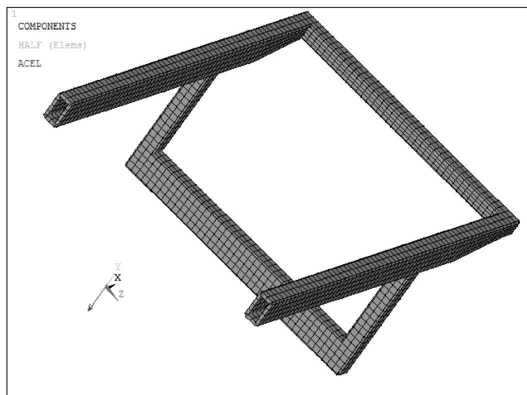


图 13-29 显示单元厚度

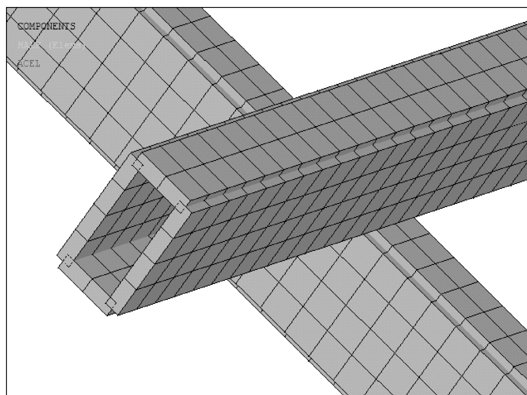


图 13-30 箱梁细节

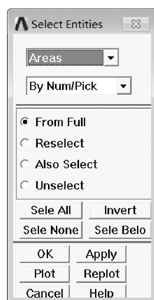


图 13-31 Select Entities 对话框

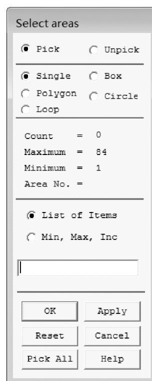


图 13-32 Select areas 对话框

选择编号定义方式为 Min,Max,Inc，在下方的输入框中输入 1,5,4，单击 OK 按钮，选出图 13-33 所示面。

回到图 13-31 所示的 Select Entities 对话框，将选择方式改为 Also Select，单击 Apply 按钮。参照上述方式，选出表 13-6 列出的全部面，结果应如图 13-34 所示。

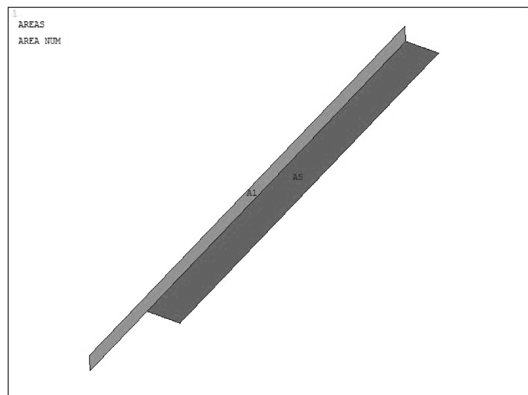


图 13-33 选择面

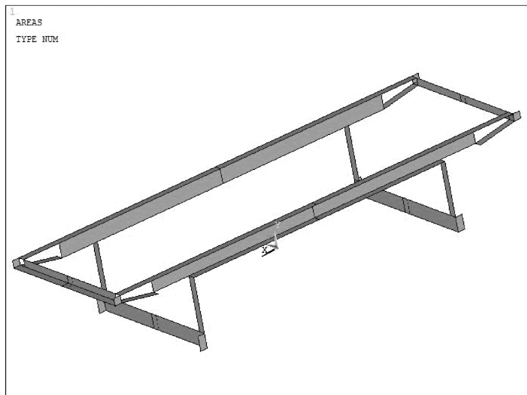


图 13-34 完成面的选择

表 13-6 选择面

Min	Max	Inc	Min	Max	Inc
1	5	4	75	80	5
22	26	4	54	59	5
43	47	4	12	17	5
64	68	4	33	38	5
30	72	42	53	58	5
41	83	42	11	16	5
20	62	42	32	37	5
9	51	42	74	79	5
36	78	42	10	31	21
15	57	42	52	73	21

（21）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Reverse Normals > of Areas 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，完成法向反转。

（22）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，参考前文的说明，选出 40、82、19、61 四个面如图 13-35 所示。在 SelectEntities 对话框中，更改选择对象为 Nodes，选择方式为 Attached to，单击 OK 按钮，选出这些面上的节点，如图 13-36 所示。

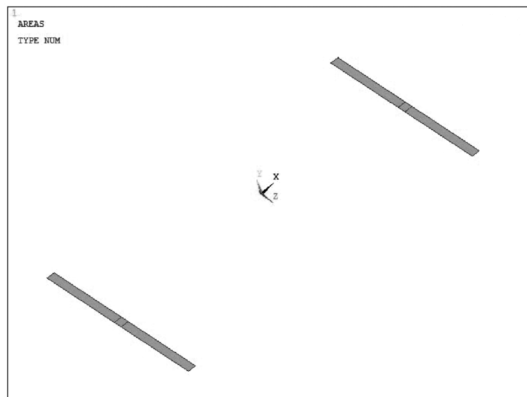


图 13-35 选择面

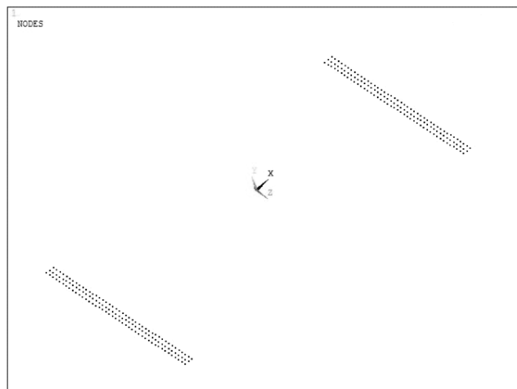


图 13-36 选出节点

（23）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，弹出图 13-37 所示的 Apply U,ROT on Nodes 对话框。

设置约束的自由度为 All DOFs，单击 OK 按钮，完成约束后如图 13-38 所示。

（24）至此完成模型的建立与约束的定义，下面将在此基础之上进行分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 13-39 所示的 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Statics（即静态分析），单击 OK 按钮，完成分析类型设置。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Inertia >

Gravity > Global 命令，弹出图 13-40 所示的 Apply（Gravitational）Acceleration（定义重力加速度）对话框，设置重力加速度为 ACEL Y Global Cartesian Y - comp =9.8，单击 OK 按钮。

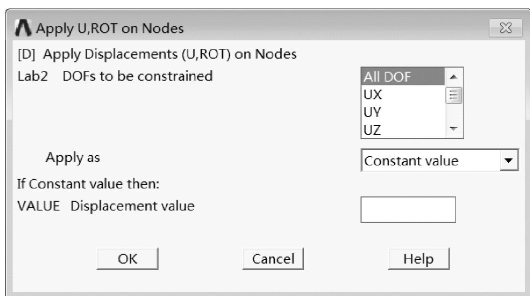


图 13-37 Apply U,ROT on Nodes 对话框

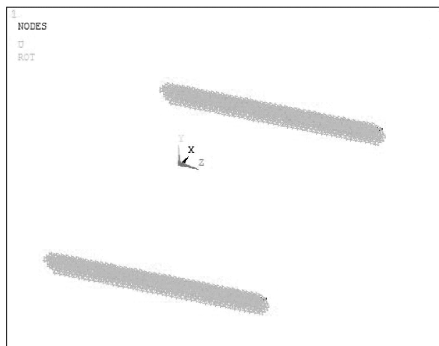


图 13-38 定义约束

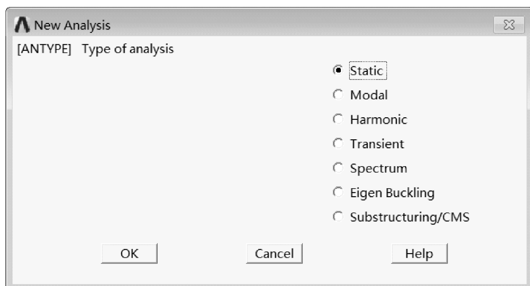


图 13-39 New Analysis 对话框

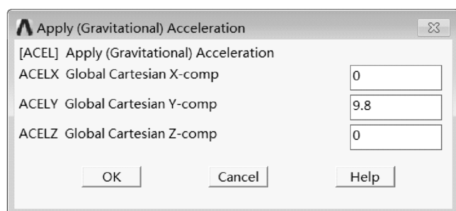


图 13-40 定义重力加速度

（25）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，弹出图 13-41 所示的/STATUS Command 窗口，其中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 13-42 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

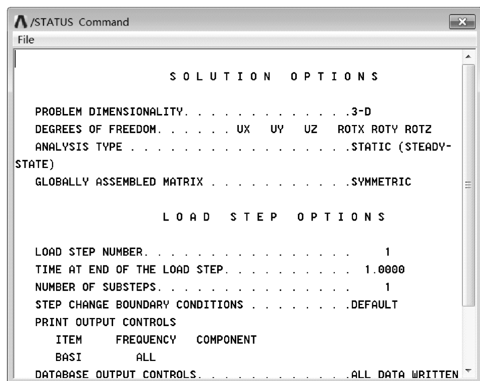


图 13-41 /STATUS Command 窗口

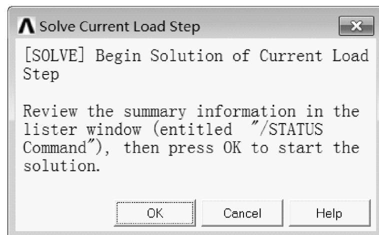


图 13-42 /Solve Current Load Step 对话框

单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明求解完成。

本例的分析过程也可以以命令流方式进行。



```
FINI                                                    ! 清空工作区
/CLE                                                    !
/NERR,,99999999                                         ! 调整警告数量限制
*SET,B,40                                               ! 定义参数
*SET,H,15                                               !
*SET,L,120                                              !
*SET,L_S,20                                             !
*SET,L_S_1,10                                           !
*SET,H_S_1,4                                            !
*SET,B_S_1,2                                            !
*SET,L_S_2,10                                           !
*SET,H_S_2,2                                            !
*SET,B_S_2,2                                            !
*SET,L_H,40                                             !
*SET,B_H,2                                              !
*SET,H_H,2                                              !
*SET,L_KZ,80                                            !
*SET,H_KZ,4                                             !
*SET,B_KZ,2                                             !
*SET,L_ZC,15                                            !
*SET,HS_ZC,4                                            !
*SET,B_ZC,2                                             !
*SET,L_KJ,40                                            !
*SET,H_KJ,4                                             !
*SET,B_KJ,2                                             !
*SET,E_L,2.1E10                                         !
*SET,U_L,0.3                                            !
*SET,DENS_L,7800                                        !
*SET,T,0.5                                              !
                                                        !
/PREP7                                                  ! 进入前处理器
ET,1,181                                                ! 单元类型
MP,EX,1,E_L                                             ! 材料参数
MP,PRXY,1,U_L                                           !
MP,DENS,1,DENS_L                                        !
F=0.25*(45E4*1.02+60E4*1.2)                             ! 定义荷载
SECTYPE,,SHELL                                          ! 定义截面
SECDATA,T                                               !
                                                        !
K,1,0,H+H_KZ/2,-B/2+B_KZ/2                              ! 生成关键点
K,2,0,H+H_KZ/2,-B/2-B_KZ/2                              !
K,3,0,H-H_KZ/2,-B/2-B_KZ/2                              !
K,4,0,H-H_KZ/2,-B/2+B_KZ/2                              !
KGEN,2,1,4,1,L_KZ/2,,,100                               ! 复制关键点
KGEN,2,103,104,1,-B_ZC/2                                !
KGEN,2,103,104,1,B_ZC/2                                 !
KGEN,2,1,4,1,L_KZ/2+L_S_1,,,200                         !
K,301,L/2+B_H/2,H+H_KZ/2,-B/2+B_KZ/2                    ! 定义关键点
K,302,L/2+B_H/2,H+H_KZ/2,-B/2-B_KZ/2                    !
K,303,L/2+B_H/2,H+H_KZ/2-H_H,-B/2-B_KZ/2                !
K,304,L/2+B_H/2,H+H_KZ/2-H_H,-B/2+B_KZ/2                !
KGEN,2,5,8,1,,-L_ZC,                                    ! 复制关键点
KGEN,2,302,303,1,B_H                                    !
KGEN,2,13,14,1,,,L_H/2+B_KZ                             !
```

```
KGEN,2,15,16,1, - B_H                                        !
KGEN,2,9,11,2,, - H_KJ                                       !
KGEN,2,19,20,1,,,L_H/2 + B_KZ                                !
KGEN,2,21,22,1,,H_KJ                                         !
                                                             !
A,1,2,302,301,1                                              ! 将关键点围成面
A,2,202,203,3,2                                              !
A,202,302,303,203,202                                        !
A,201,301,304,204,201                                        !
A,201,204,4,1,201                                            !
A,6,10,12,8,6                                                !
A,8,12,11,7,8                                                !
A,7,11,9,5,7                                                 !
A,6,10,9,5,6                                                 !
A,3,4,6,5,3                                                  !
A,203,204,304,303,203                                        !
A,302,303,14,13,302                                          !
A,201,204,304,301,201                                        !
A,13,15,16,14,13                                             !
A,302,17,15,13,302                                           !
A,301,17,18,304,301                                          !
A,303,18,16,14,303                                           !
A,9,19,20,11,9                                               !
A,11,24,22,20,11                                             !
A,20,22,21,19,20                                             !
A,21,19,9,23,21                                              !
A,10,23,24,12,10                                             !
ARSYM,X,ALL                                                  ! 镜像复制
ARSYM,Z,ALL                                                  !
ALLSEL                                                       !
NUMMRG,KP                                                    ! 合并重合的关键点
                                                             !
ESIZE,1                                                      ! 定义单元尺寸
AMESH,ALL                                                    ! 划分面单元
ALLSEL                                                       !
NUMMRG,ALL                                                   ! 合并重合的项目
ASEL,S,AREA,,1,5,4                                           ! 选择面
ASEL,A,AREA,,22,26,4                                         !
ASEL,A,AREA,,43,47,4                                         !
ASEL,A,AREA,,64,68,4                                         !
ASEL,A,AREA,,30,72,42                                        !
ASEL,A,AREA,,41,83,42                                        !
ASEL,A,AREA,,20,62,42                                        !
ASEL,A,AREA,,9,51,42                                         !
ASEL,A,AREA,,36,78,42                                        !
ASEL,A,AREA,,15,57,42                                        !
ASEL,A,AREA,,75,80,5                                         !
ASEL,A,AREA,,54,59,5                                         !
ASEL,A,AREA,,12,17,5                                         !
ASEL,A,AREA,,33,38,5                                         !
ASEL,A,AREA,,53,58,5                                         !
ASEL,A,AREA,,11,16,5                                         !
ASEL,A,AREA,,32,37,5                                         !
ASEL,A,AREA,,74,79,5                                         !
ASEL,A,AREA,,10,31,21                                        !
ASEL,A,AREA,,52,73,21                                        !
```

```
AREVERSE,ALL                    ! 定义面的法向
ASEL,S,,,40,82,42               !
ASEL,A,,,19,61,42               !
NSLA,S,1                        !
D,ALL,ALL                       ! 约束底面
                                !
/SOLU                           ! 进入求解器
ANTYPE,STATIC                   ! 选择静态分析
ACEL,0,9.8                      ! 定义重力加速度
ALLSEL,all                      !
SOLVE                           ! 求解
FINI                            !
```

（26）此时进入通用后处理器，就可以查看只在重力作用下的静态分析求解结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 13-43 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution > DOF Solution > Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中看到位移云图，如图 13-44 所示。以同样的方法显示项目正应力的节点解，如图 13-45 和图 13-46 所示。

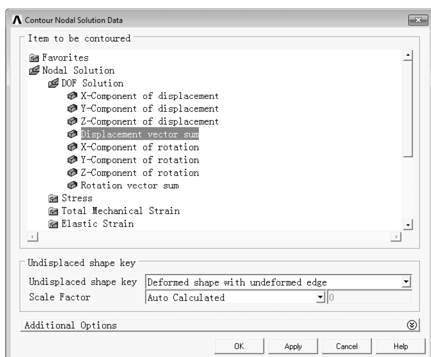


图 13-43　Contour Nodal Solution Data 对话框

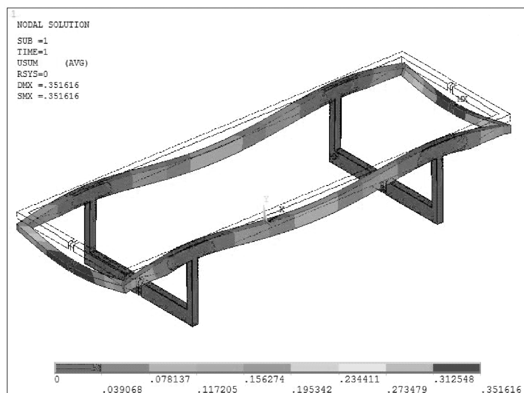


图 13-44　显示位移云图

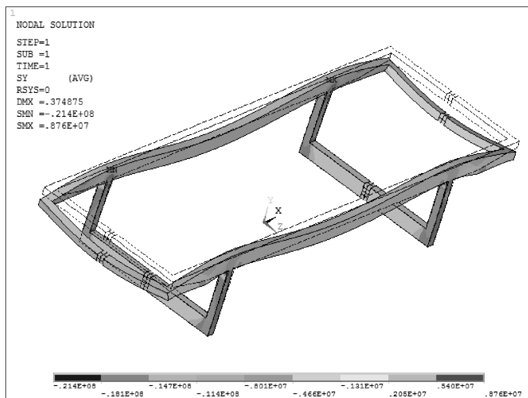


图 13-45　Y 方向应力云图

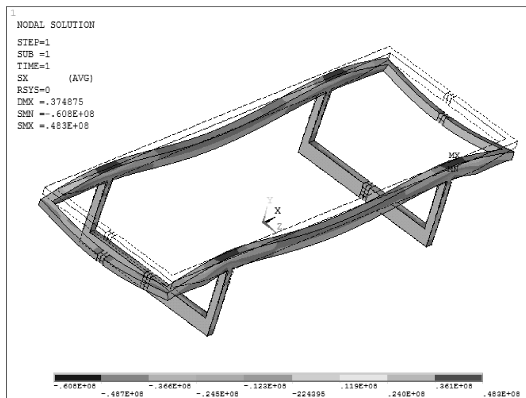


图 13-46　X 方向应力云图

XY 剪应力云图与第一主应力云图如图 13-47 和图 13-48 所示。

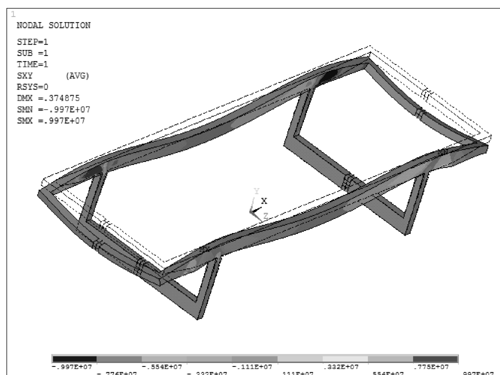


图 13-47 XY 剪应力云图

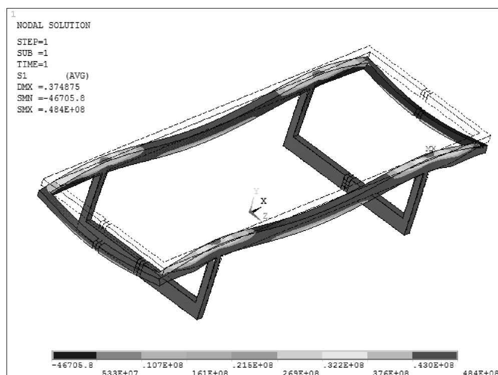


图 13-48 第一主应力云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined 命令，弹出图 13-49 所示的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框。

选择显示的矢量为 Translation U，单击 OK 按钮，则显示图 13-50 所示的平移矢量；选择显示的矢量为 Rotation ROT，单击 OK 按钮，则显示图 13-51 所示的转动矢量。

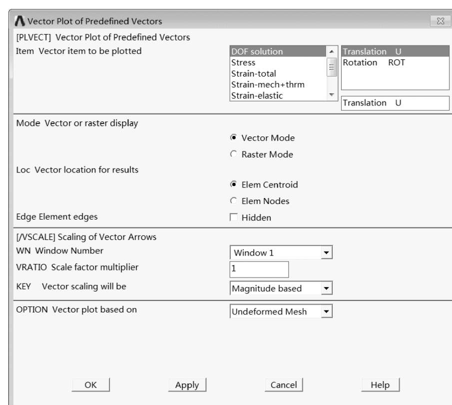


图 13-49 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

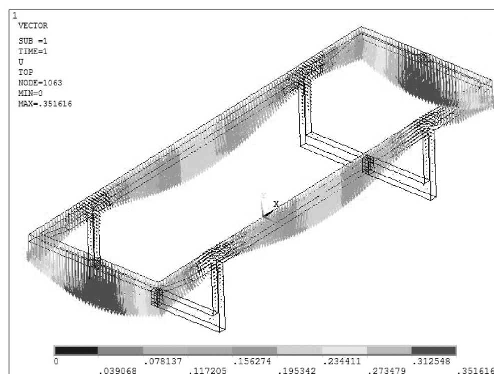


图 13-50 平动矢量

参考上述方法，显示主应力矢量，如图 13-52 所示。

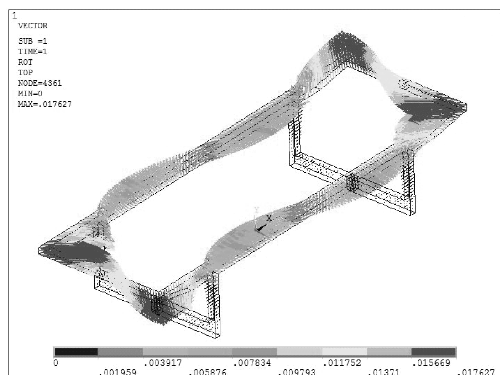


图 13-51 转动矢量

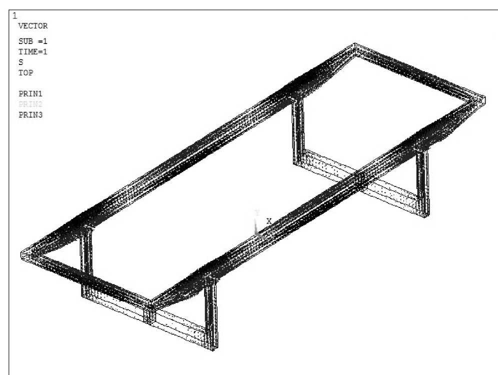


图 13-52 主应力矢量

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Symbols 命令，弹出图 13-53 所示的 Symbols 对话框。

在该对话框中选中 All Reactions 单选按钮，单击 OK 按钮。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot > Elements 命令，则在工作区中显示底部约束反力，如图 13-54 所示。

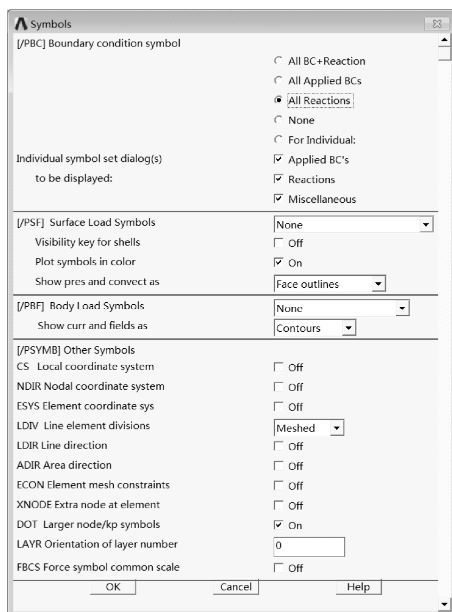


图 13-53　Symbols 对话框

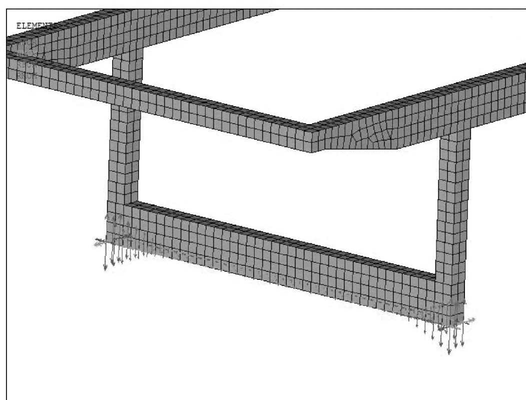


图 13-54　约束反力

13.2.2 瞬态动力学分析

（1）完成静力求解后，进行动态分析，求解其在移动荷载下的瞬响应。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 13-55 所示的 New Analysis 对话框，将分析类型设置为 Transient（即瞬态分析），单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Transient 命令，弹出 Solution Controls 对话框，设置如图 13-56 所示，单击 OK 按钮。

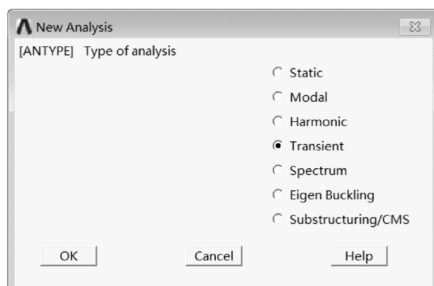


图 13-55　New Analysis 对话框

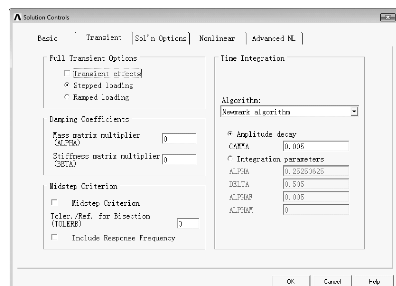
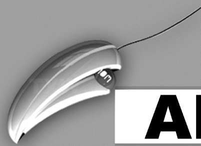


图 13-56　Solution Controls 对话框

在 Solution Controls 对话框中选择 Basic 选项卡，设置如图 13-57 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Inertia >



Gravity > Global 命令，弹出图 13-58 所示的 Apply（Gravitational）Acceleration 定义重力加速度，对话框，设置 ACELY Global Cartesian Y - comp 为 -9.8，单击 OK 按钮。

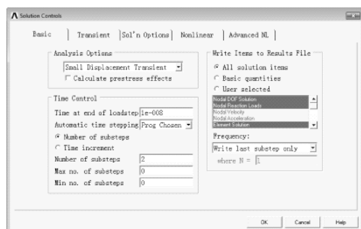


图 13-57 Basic 选项卡

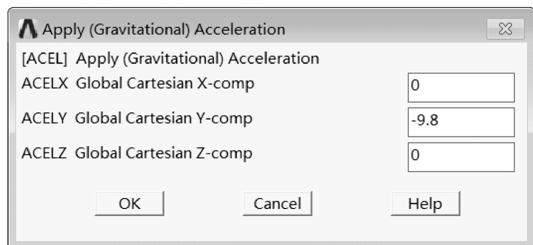


图 13-58 定义重力加速度

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，在弹出的 Slove Current Load Step 对话框中单击 OK 按钮，开始求解第 1 步。当弹出 Solution is done！提示时，表明求解完成。

（2）完成第 1 步求解后，开始定义荷载。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Transient 命令，弹出图 13-59 所示 Solution Controls 对话框。在 Transient 选项卡中选中 Full Transient Options 选项组中的 Transient effects 复选框，设置加载方式为 Stepped loading 单击 OK 按钮。

（3）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls 命令，弹出 Solution Controls 对话框。在 Basic 选项卡中设置 TIME = 1，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Delete > All Load Data > All Forces > On All Nodes 命令，删除全部约束与荷载。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，利用弹出的 Select Entities 对话框选出 X = -61、Y = 17 且 Z = -20 的节点。选出的节点应如图 13-60 所示。

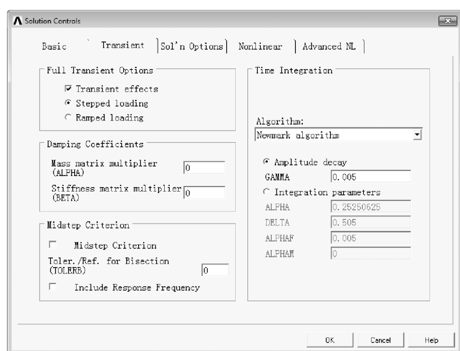


图 13-59 Solution Controls 对话框

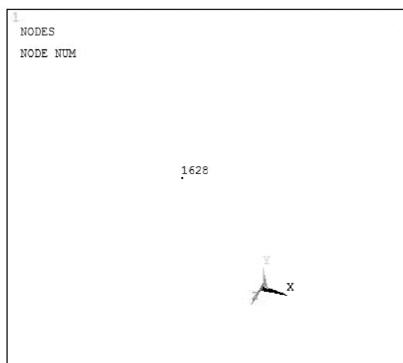


图 13-60 选出加载对象

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes 命令，弹出图 13-61 所示的 Apply F/M on Nodes 对话框。选择荷载的方向为 FY，值为 -F，单击 OK 按钮。

重复上述操作，为 X = -53、Y = 17、Z = -20 的节点施加 FY 方向、大小为 -F 的集中力。

重复上述操作，为 X = -61、Y = 17、Z = 20 的节点施加 FY 方向、大小为 -F 的集中力。

重复上述操作，为 X = 53、Y = 17、Z = 20 的节点施加 FY 方向、大小为 – F 的集中力。

完成这 4 个节点的加载后，进行输出控制。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > DB/Results File 命令，在弹出的对话框中选择输出全部结果，单击 OK 按钮。

完成第 1 步输出设置后，在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Write LS File 命令，弹出图 13–62 所示的 Write Load Step File 对话框，输入载荷步编号 1，单击 OK 按钮，完成第 1 个荷载步文件的定义。

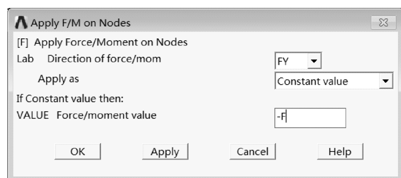


图 13–61 Apply F/M on Nodes 对话框

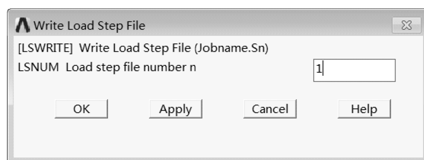


图 13–62 Write Load Step File 对话框

（4）接下来，重复上述步骤（3）的操作，定义第 2 ~ 115 步的荷载步文件。在定义这些荷载步文件的时候，应注意如下问题。

- 对于第 I 荷载步，上述 4 个节点的 X 坐标均应在步骤（3）所列出的坐标的基础上加（I – 1），Y、Z 坐标值不变，荷载的方向及大小不变。
- 每一荷载步均应通过 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls 命令，在弹出的 Solution Controls 对话框的 Basic 选项卡中输入 TIME 的值，每一步 TIME 的值等于当前荷载步的序号数。
- 每完成一次定义，通过 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Write LS File 命令，生成一个荷载步文件，每一步输入的编号比上一步增加 1。

（5）完成荷载步定义后，在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > From LS Files 命令，弹出图 13–63 所示的 Solve Load Step Files 对话框，设置 LSMIN Starting LS file number 为 1，LSMAX Ending LS file number 为 115，LSINC File number increment 为 1，单击 OK 按钮开始求解。

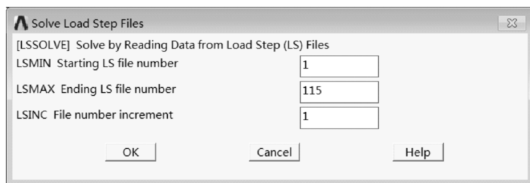


图 13–63 Solve Load Step Files 对话框

以上求解过程也可以使用 APDL 命令流进行操作，且更为方便。

```
/SOLU                    ! 进入求解器
ALLSEL                   ! 全选模型
ANTYPE,TRANS             ! 定义分析类型为瞬态分析
TRNOPT,FULL              ! 全部求解器
TIMINT,OFF               ! 关闭瞬态效应
NLGEOM,OFF               ! 关闭大变形
TIME,1E-8                ! 定义时间
```

```
NSUBST,2                                  ! 子步数为 2
KBC,1                                     ! 使用阶跃加载
ACEL,0,-9.8                               ! 施加全局加速度
SOLVE                                     ! 求解

TIMINT,ON                                 ! 打开瞬态效应
TIM=0                                     ! 定义时间初始值
DELT=1                                    !

*DO,I,1,114,1.000                         ! 循环控制
TIM=TIM+1                                 ! 定义当前步的时间
TIME,TIM                                  !
FDELE,ALL,ALL                             ! 删除上一步的荷载
ALLSEL                                    !

NSEL,S,LOC,X,-61+(I-1)                    ! 选择加载点
NSEL,R,LOC,Y,17                           !
NSEL,R,LOC,Z,-20                          !
F,ALL,FY,-F                               ! 施加集中力
ALLSEL                                    !

NSEL,S,LOC,X,-53+(I-1)                    ! 选择加载点
NSEL,R,LOC,Y,17                           !
NSEL,R,LOC,Z,-20                          !
F,ALL,FY,-F                               ! 施加集中力
ALLSEL                                    !

NSEL,S,LOC,X,-61+(I-1)                    ! 选择加载点
NSEL,R,LOC,Y,17                           !
NSEL,R,LOC,Z,20                           !
F,ALL,FY,-F                               ! 施加集中力
ALLSEL                                    !

NSEL,S,LOC,X,-53+(I-1)                    ! 选择加载点
NSEL,R,LOC,Y,17                           !
NSEL,R,LOC,Z,20                           !
F,ALL,FY,-F                               ! 施加集中力
ALLSEL                                    !

NSUBST,1                                  ! 子步数为 1
OUTRES,ALL,ALL                            ! 全部输出
SOLVE                                     ! 求解
*ENDDO                                    ! 循环结束
                                          !
FINI                                      !
```

完成求解后即可进行后处理。

（6）在 GUI 界面中的命令输入框中输入如下命令，并按〈Enter〉键。

```
/POST26                                   ! 进入时间历程后处理器
NSOL,2,22,U,Y,BX32                        ! 22 号节点 Y 方向位移曲线
NSOL,3,2,U,X,UX_2                         ! 2 号节点 X 方向位移曲线
NSOL,4,2,U,Z,UZ_2                         ! 2 号节点 Z 方向位移曲线
NSOL,5,1628,U,Y,UY_1628                   ! 1628 号节点 Y 方向位移曲线
NSOL,6,1628,U,X,UX_1628                   ! 1628 号节点 X 方向位移曲线
NSOL,7,1628,U,Z,UZ_1628                   ! 1628 号节点 Z 方向位移曲线
```

在 GUI 界面中选择 Main Menu > TimeHist PostPro 命令，弹出图 13-64 所示的 Time History Variables 对话框，在 Variable List（变量列表）列表框中列出了上述命令所定义的曲线。

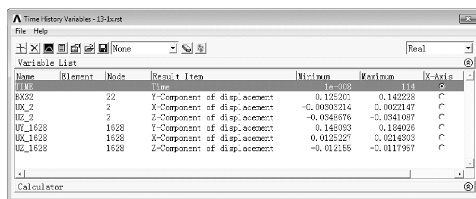


图 13-64　变量列表

选择第一个变量 BX32，单击工具框中的绘制曲线按钮，工作区中绘制的曲线如图 13-65 所示。

以同样的方法绘制出 2 号节点 X 方向位移曲线，如图 13-66 所示。

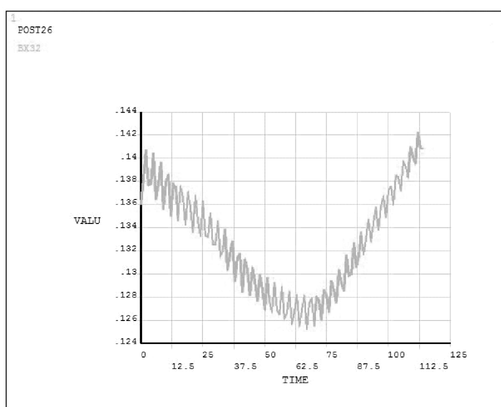


图 13-65　22 号节点 Y 方向位移曲线

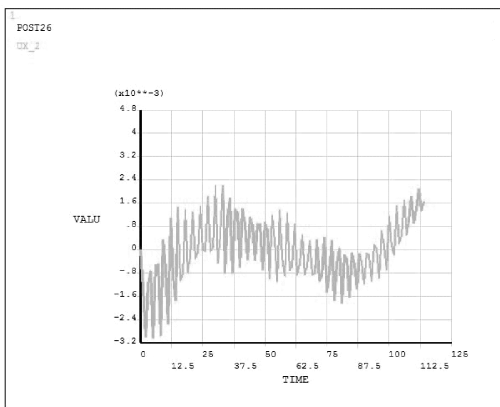


图 13-66　2 号节点 X 方向位移曲线

2 号节点 Z 方向位移曲线如图 13-67 所示，1628 号节点 Y 方向位移曲线如图 13-68 所示。

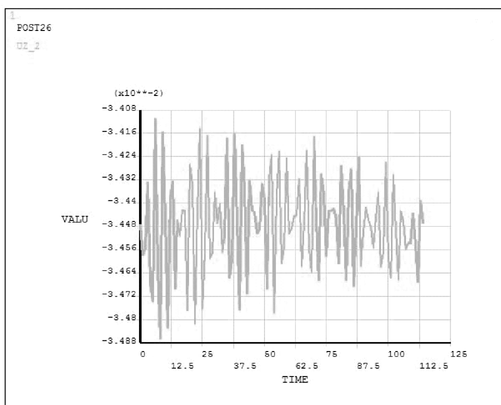


图 13-67　2 号节点 Z 方向位移曲线

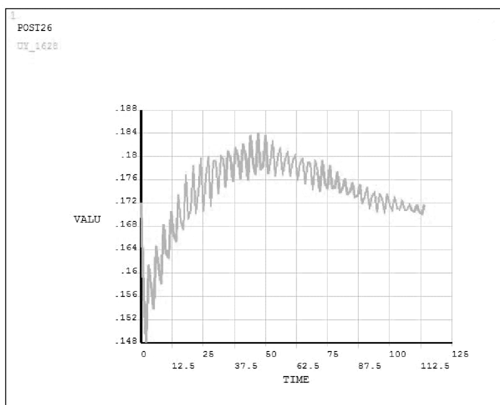


图 13-68　1628 号节点 Y 方向位移曲线

1628 号节点 X 方向位移曲线如图 13-69 所示，1628 号节点 Z 方向位移曲线如图 13-70 所示。

（7）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择 Nodal Solution > DOF Solution > Displacement Vector Sum（位移矢量和），如图 13-71 所示。单击 OK 按钮，显示初始位移云图，图 13-72 所示。

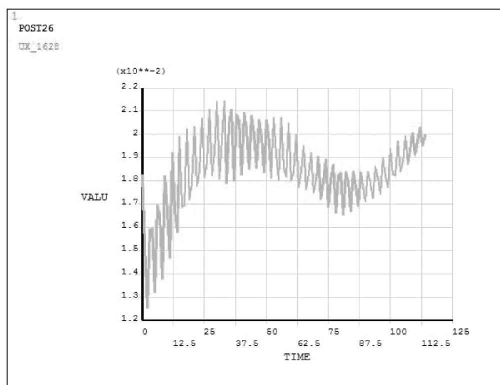


图 13-69 1628 号节点 X 方向位移曲线

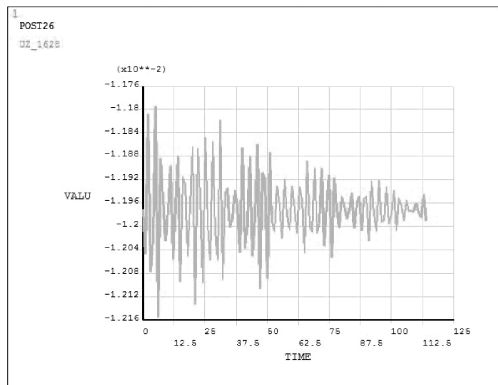


图 13-70 1628 号节点 Z 方向位移曲线

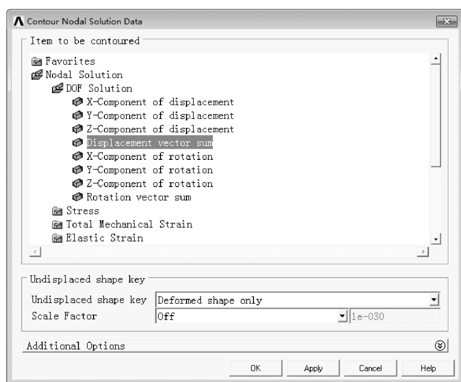


图 13-71 Contour Nodal Solution Data 对话框

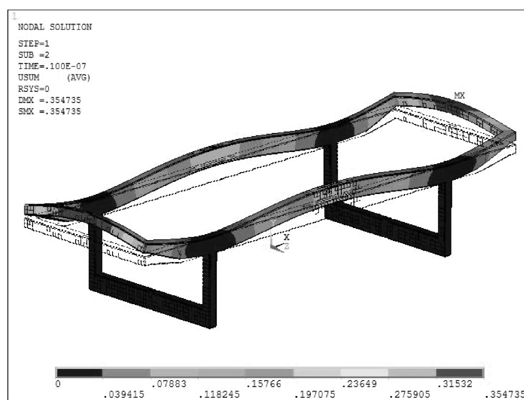


图 13-72 初始位移云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > Next Set 命令，依次读取其后 4 阶结果，显示各时期位移云图，如图 13-73 ~ 图 13-76 所示。

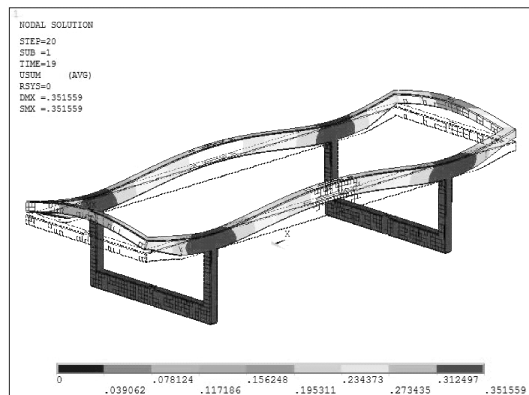


图 13-73 第 20 步位移云图

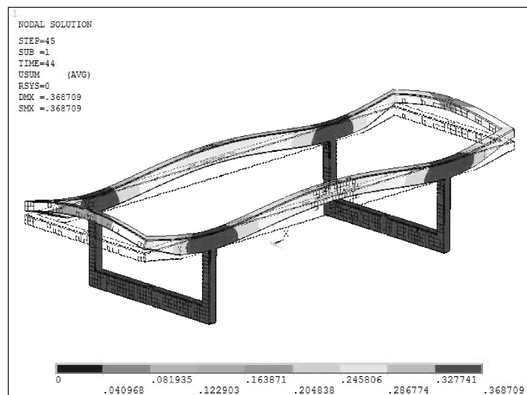


图 13-74 第 45 步位移云图

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，弹出图 13-77 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择 Nodal Solution

> Stress > lst Principal Stress（第一主应力），单击 OK，显示初始应力云图，如图 13-78 所示。

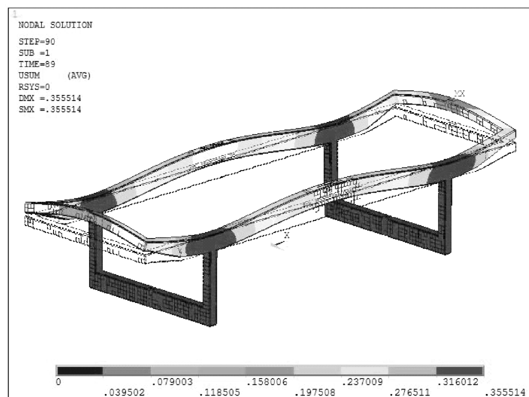


图 13-75　第 90 步位移云图

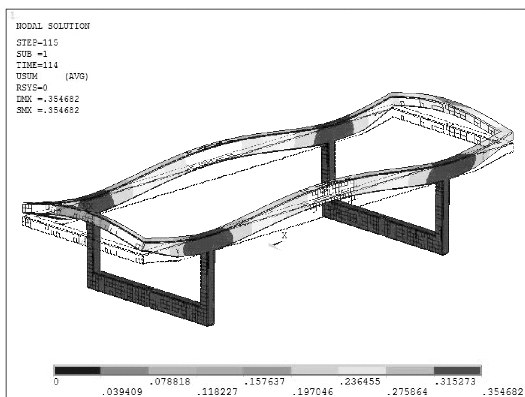


图 13-76　第 115 步位移云图

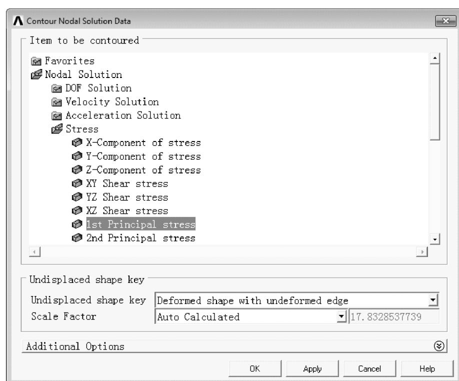


图 13-77　Contour Nodal Solution Data 对话框

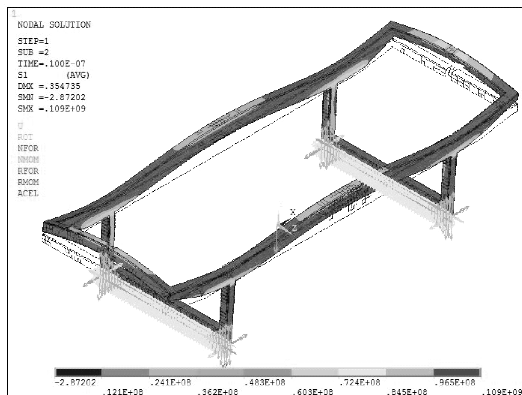


图 13-78　初始应力云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > Next Set 命令，依次读取其后各阶结果，显示各时期应力云图，如图 13-79 ~ 图 13-82 所示。

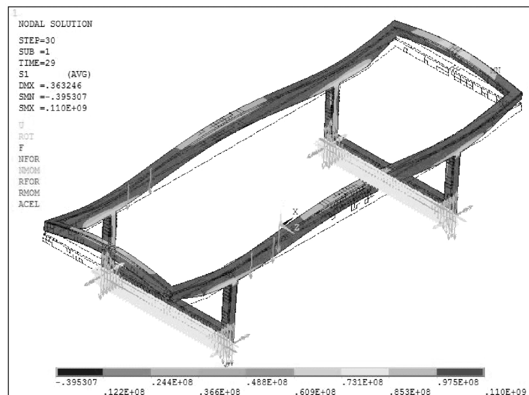


图 13-79　第 30 子步应力云图

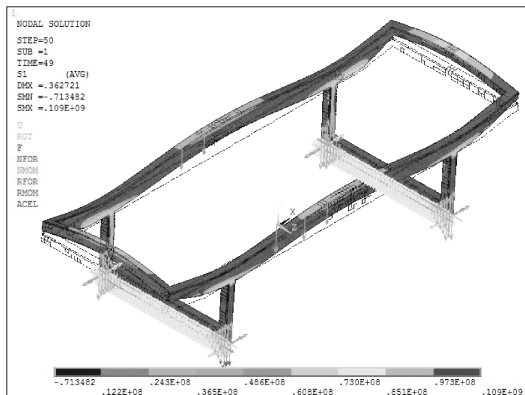


图 13-80　第 50 子步应力云图

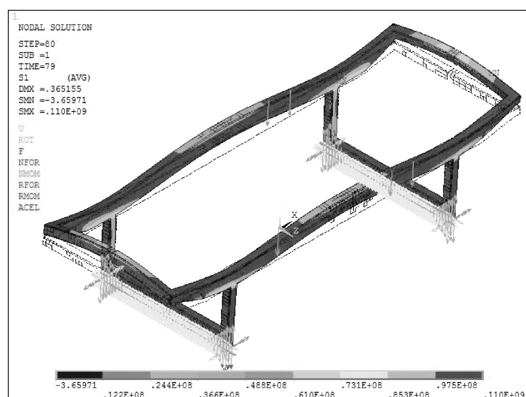


图 13-81 第 80 子步应力云图

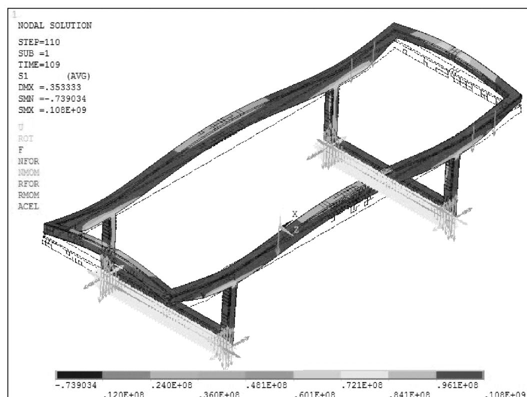


图 13-82 第 110 子步应力云图

13.2.3 模态分析

（1）下面进行模态求解。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 13-83 所示的 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Modal（即模态分析），单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options 命令，弹出 Modal Analysis 对话框，设置如图 13-84 所示，单击 OK 按钮。

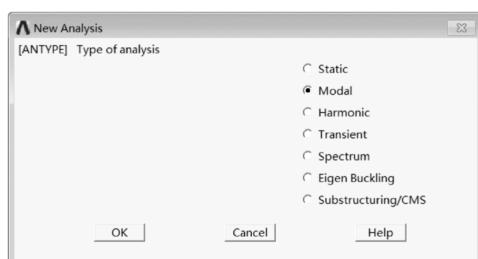


图 13-83 New Analysis 对话框

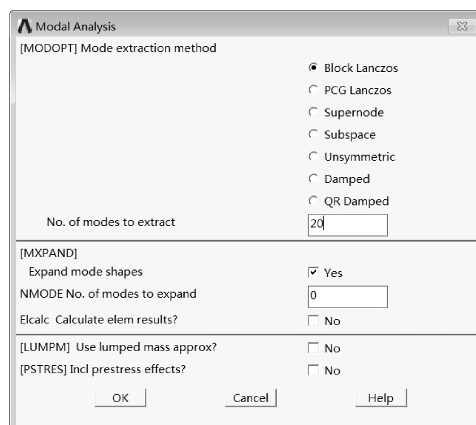


图 13-84 Modal Analysis 对话框

（2）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，在弹出的 Solve Current Load Step 对话框中单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明求解完成。

（3）求解完成后，在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Results Summary 命令，弹出图 13-85 所示的 SET，LIST Command 窗口，其中显示了网架的前 20 阶固有频率。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > First Set 命令，读入第 1 阶的结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu

命令，弹出图 13-86 所示的对话框。选择 Nodal Solution > DOF Solution > Displacement Vector Sum（位移矢量），单击 OK 按钮，显示第 1 阶振型位移云图，如图 13-87 所示。

SET,LIST Command
File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.36967	1	1	1
2	0.37346	1	2	2
3	0.44062	1	3	3
4	0.44100	1	4	4
5	0.56847	1	5	5
6	0.57664	1	6	6
7	0.68711	1	7	7
8	0.73960	1	8	8
9	0.81542	1	9	9
10	0.93440	1	10	10
11	1.0673	1	11	11
12	1.0870	1	12	12
13	1.3209	1	13	13
14	1.3879	1	14	14
15	1.5598	1	15	15
16	1.7784	1	16	16
17	1.8891	1	17	17
18	2.0052	1	18	18
19	2.2069	1	19	19
20	2.4406	1	20	20

图 13-85　前 20 阶固有频率

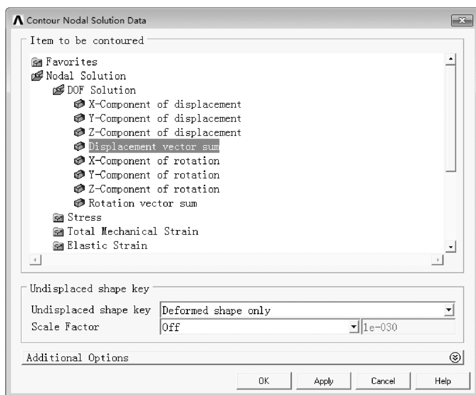


图 13-86　Contour Nodal Solution Data 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Read Results > Next Set 命令，读取其后各阶结果，显示各阶振型位移云图，如图 13-88 ~ 图 13-91 所示。

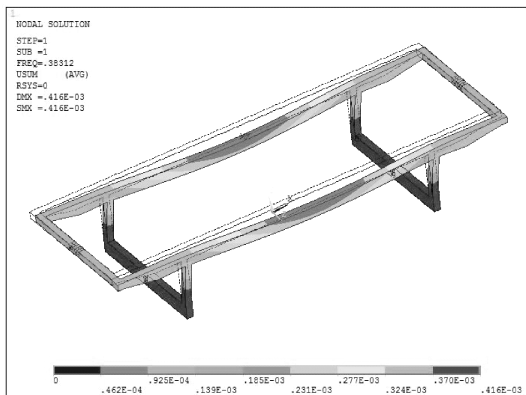


图 13-87　第 1 阶振型位移云图

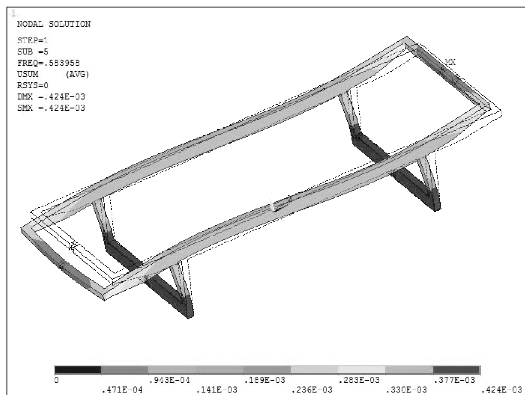


图 13-88　第 5 阶振型位移云图

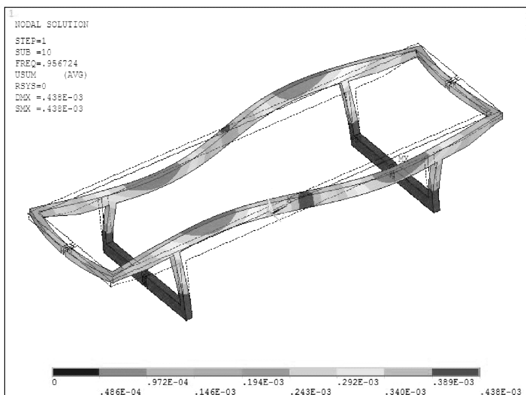


图 13-89　第 10 阶振型位移云图

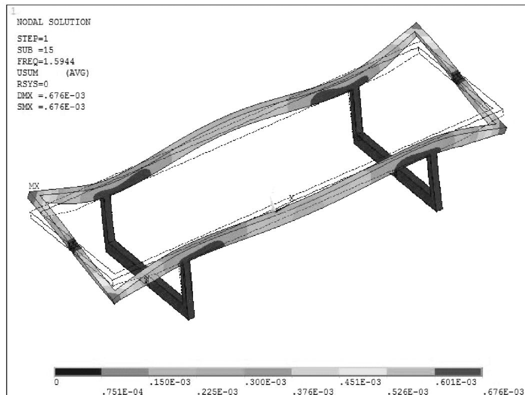


图 13-90　第 15 阶振型位移云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined 命令，弹出图 13-92 所示的对话框。选择 Translation U（平移矢量），显示第 1 阶振型矢量图，如图 13-93 所示。

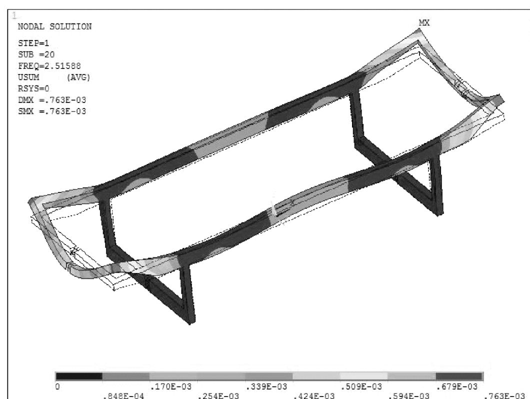


图 13-91 第 20 阶振型位移云图

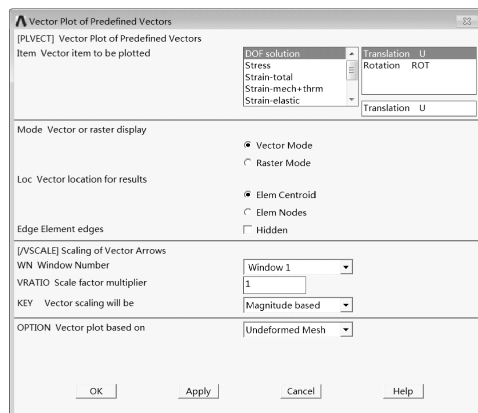


图 13-92 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

读取其后各阶结果，显示各阶振型位移矢量图，如图 13-94 ~ 图 13-97 所示。

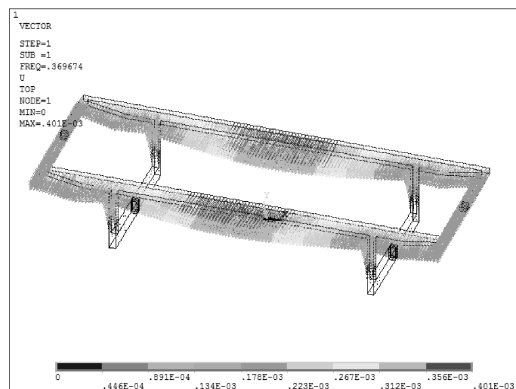


图 13-93 第 1 阶振型位移矢量图

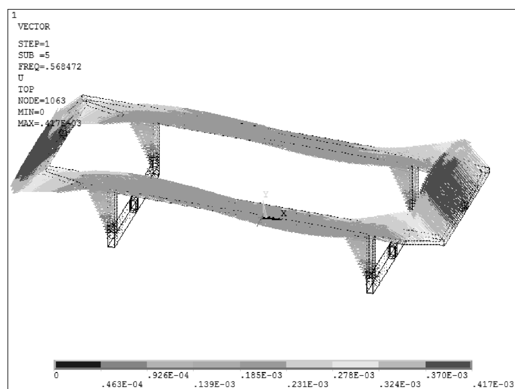


图 13-94 第 5 阶振型位移矢量图

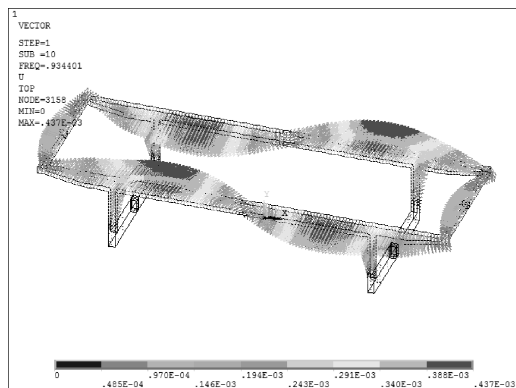


图 13-95 第 10 阶振型位移矢量图

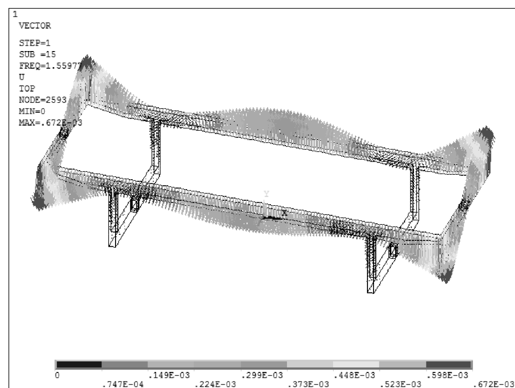


图 13-96 第 15 阶振型位移矢量图

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Mode Shape 命令，弹出图 13-98 所示的 Animate Mode Shape 对话框。

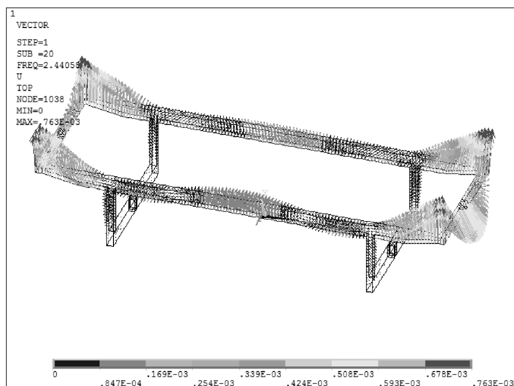


图 13-97　第 20 阶振型位移矢量图

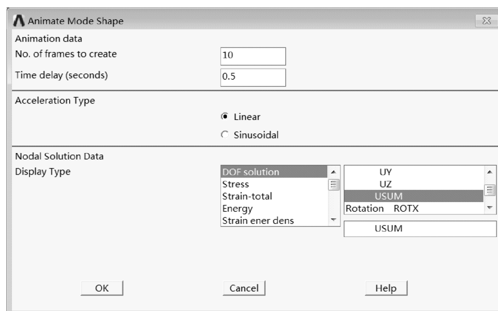


图 13-98　Animate Mode Shape 对话框

选择 USUM，单击 OK 按钮，就可以在工作区中运行动画仿真。

（4）单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出 Exit 对话框。

选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮，退出 ANSYS。

13.3　本章小结

本章以起重机这一大型机械设备为例，全面讲解了实际问题中静力学分析与动学力分析相结合、GUI 操作与命令流相结合、多种分析技术相融合的分析过程。

在复杂的分析项目中，希望读者不要拘泥于选择某一技术或方法进行分析，强行套用某些分析思想进行分析往往得不到合理的结果，只有多种技术融会贯通、多种思想取长补短，才能得到理想的效果。

第三篇

土木工程应用篇

本篇开篇第 14 章钢筋混凝土基本问题分析，从不同角度分别列举了一个典型的工程实例。从钢筋混凝土构件的角度出发，主要列举了钢筋混凝土板的实例。其余如梁、柱等构件的，分析步骤均可参考此例。本章随后又从混凝土受力构件正常使用极限状态分析的角度出发，给出了开裂分析的实例，从混凝土工艺的角度给出了预应力钢筋混凝土的仿真方法。

第 15 章钢结构及钢筋混凝土结构分析，列举了土木工程中最典型的两种材料体系，以帮助读者熟悉其建模及分析方法。

第 16 章膜结构及网壳结构分析，列举了两种在大跨度公共建筑中比较常用的结构体系，其重点和难点在于复杂建模。其中提及的结构找形分析是处理这类问题的一个重点。

第 17 章基础工程分析，列举了基础工程中最基本的两种基础形式，其重点在于讲解 ANSYS 软件在基础工程中的应用方法，以及接触单元这一特殊单元的应用。

第 18 章桥梁工程实例分析和第 19 章隧道工程实例分析，涉及 ANSYS 在土木工程中最常见的应用领域。二者重点都在于利用生死单元的施工过程模拟方法，以及地震作用下的动力响应分析方法。

在本篇各章中，每个实例及其分析方法都最大可能地代表 ANSYS 的多种分析功能，以提高土木工程方向的读者使用 ANSYS 软件进行分析的能力。

第 14 章 钢筋混凝土基本问题分析

钢筋混凝土，工程上常被简称为钢筋砼，是指通过在混凝土中加入钢筋与之共同工作来改善混凝土力学性质的一种组合材料，为加筋混凝土最常见的一种形式。钢筋混凝土是当今最主要的建筑材料之一。

本章将对钢筋混凝土板及混凝土的开裂性能、预应力钢筋混凝土进行建模分析。

本章学习目标

- 掌握钢筋混凝土问题的常用单元类型
- 掌握钢筋混凝土板的建模方法
- 掌握钢筋混凝土开裂问题的分析方法
- 掌握预应力的添加思路

14.1 钢筋混凝土板

钢筋混凝土板是用钢筋混凝土材料制成的板，是房屋建筑和各种工程结构中的基本结构或构件。本节将对其进行静力学分析。

14.1.1 问题简述

有一尺寸 2 m × 1 m 的钢筋混凝土板，厚度为 180 mm，沿长度方向均布 4 个直径为 100 mm的圆洞，如图 14-1 所示。

本例采用 SOLID65 单元作为钢筋混凝土材料。

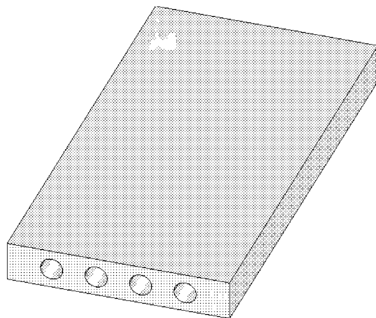


图 14-1 钢筋混凝土板几何示意图

14.1.2 前处理

为了方便读者，文中会给出详尽的 GUI 操作路径及设置方法，并且会在相应步骤给出 APDL 命令流。

（1）选择单元类型。

启动 Mechanical APOL Product Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Environment、Lisence、Working Directory 和 Job Name。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。在 GUI 界面中选择 main menu > Preferences 命令，在弹出的对话框中选中 Structural。

本例钢筋混凝土采用钢筋混凝土工程中最为常用的 SOLID65 单元，设置路径如下。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete。

通过以上路径，打开 Element Types（单元类型）对话框。单击 Add 按钮，在弹出的 Library of Element Types 对话框中选择 SOLID65。单击 OK 按钮，完成单元类型的添加，并关闭对话框。

相应的命令流如下：

```
ET,1,SOLID65
```

（2）设置材料属性。

设置材料属性路径如下。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models。

打开 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的对话框中设置钢筋混凝土材料弹性模量 EX = 21e3，泊松比 μ = 0.2。

回到 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Nonlinear > Inelastic > Non – metal Plastic > Concrete，在弹出的图 14-2 所示的 Concrete for Material Number1 对话框中，依次设置 Open Shear Transfer Coef 为 0.35，Closed Shear Transfer Coef 为 1，Uniaxial Cracking Stress 为 3.1125，Uniaxial Crushing Stress 为 – 1，单击 OK 按钮完成设置。

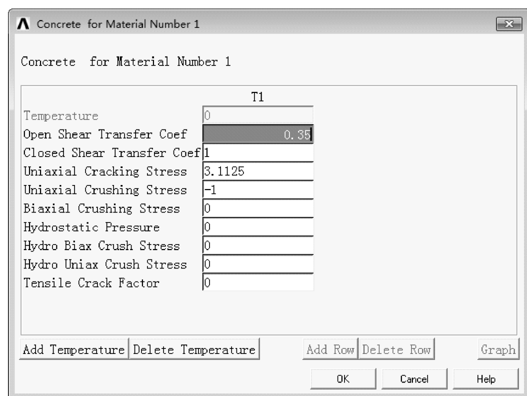


图 14-2 设置钢筋混凝土材料属性

回到 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Nonlinear > Inelastic > Rate Independent > Isotropic Hardening Plasticity > Mises Plasticity > Blinear，在弹出的对话框中定义双线性材料属性。其中在 Yield Stss 框中输入 360，在 Tang Mod 框中输入 20000。

相应的命令流如下：

```
MP,EX,1,21000
MP,PRXY,1,0.2
TB,CONC,1,1,9
TBDATA,,0.35,1,3.1125,-1
```

（3）建立几何模型。

本例模型形式较为简单，钢筋混凝土板为一扁平长方体，其中空部分为 4 个圆柱体。

生成板：通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By Dimensions，进行钢筋混凝土矩形板的生成。如图 14-3 所示，在 X1，X2 X - Coordinates 框中分别输入 0、1000，在 Y1，Y2 Y - Coordinates 框中分别输入 0、180，在 Z1，Z2 Z - Coordinates 框中分别输入 0. 2000。单击 OK 按钮，得到长方体，如图 14-4 所示。

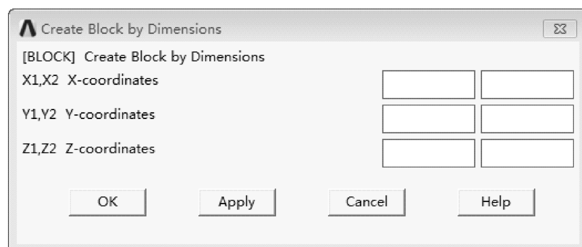


图 14-3　通过维度生成块体

生成矩形的命令流为：

```
BLC4,,,1000,180,2000
```

生成 4 个圆柱体：通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinderk > Solid Cylinder，进行板中圆柱体的生成。

再按照上述路径打开的对话框中，输入柱底圆心坐标 WP X = 200，WP Y = 90，半径 Radius = 50，Depth = 2000。单击 Apply 按钮，生成第 1 根圆柱。

以同样的方法，依次输入柱底圆心坐标 WP X = 400，WP Y = 90，半径 Radius = 50，Depth = 2000，单击 Apply 按钮，生成第 2 根圆柱；输入柱底圆心坐标 WP X = 600，WP Y = 90，半径 Radius = 50，Depth = 2000，单击 Apply 按钮，生成第 3 根圆柱；输入柱底圆心坐标 WP X = 800，WP Y = 90，半径 Radius = 50，Depth = 2000，单击 Apply 按钮，生成第四根圆柱。生成结果如图 14-5 所示。

生成圆柱的命令流如下。

```
CYL4,200,90,50,,,,2000
CYL4,400,90,50,,,,2000
CYL4,600,90,50,,,,2000
CYL4,800,90,50,,,,2000
```

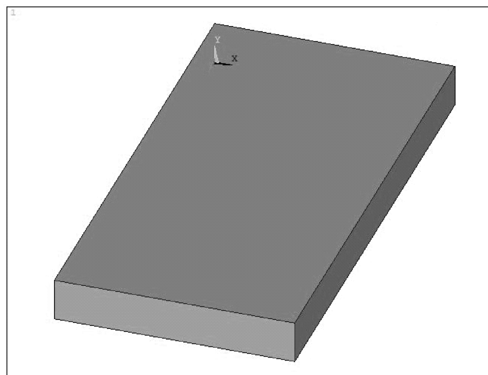


图 14-4　生成板的几何模型

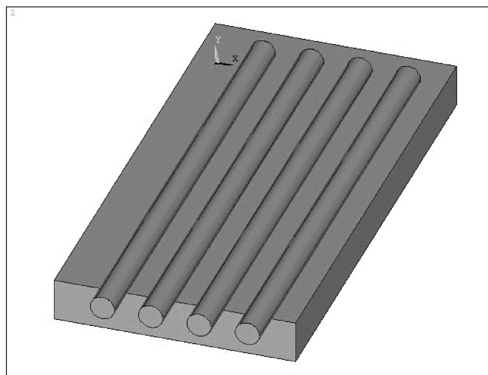


图 14-5　圆柱和板的几何模型

进行布尔运算，生成板中圆洞。路径如下。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Volumes。

首先拾取体 1，即长方体；然后拾取 4 根圆柱，或单击 Pick All 按钮；最后单击 OK 按钮，完成布尔运算。得到最后的几何模型，如图 14-6 所示。正面视图如图 14-7 所示。

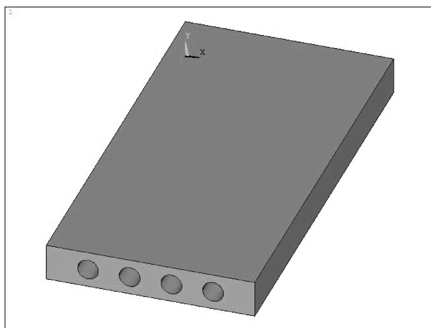


图 14-6 带洞板

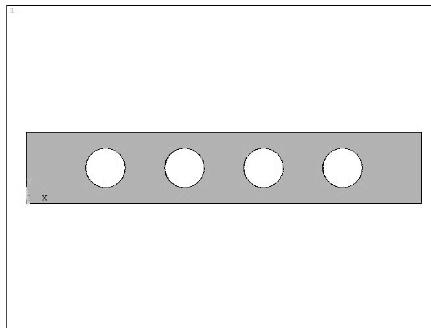


图 14-7 带洞板正面视图

注意：在布尔运算的减法运算中，选择剪除对象为 Pick All 时，所代表的意思是，从上一步拾取的体中减去除了它以外的其他所有体。

减法布尔运算命令为：

```
VSBV,1,ALL
```

（4）网格划分。

拾取模型边线，通过对线的划分来控制整个模型的单元尺寸。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > Picked Lines，拾取长边各条线，设置单元长度 SIZE 为 25，即每段 25mm；拾取短边各条线，设置 SIZE 为 25；拾取板厚方向直线，设置 SIZE 为 30。设置效果如图 14-8 所示。

设置完毕，对模型赋属性。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Volumes，拾取板，单击 OK 按钮，在弹出的 Volume Attributes 对话框中设置单元类型、实常数和材料号均为 1，其余保持默认即可。

设置完毕，在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > Sweep 命令，拾取板体，系统会沿着板长方向进行扫掠划分。完成网格划分后的效果如图 14-9 所示。

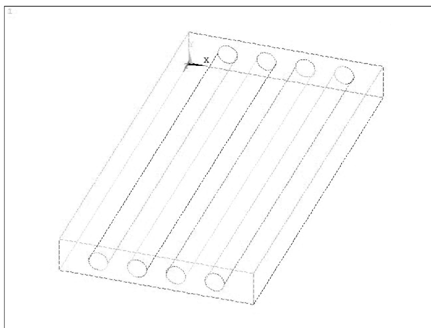


图 14-8 控制网格尺寸

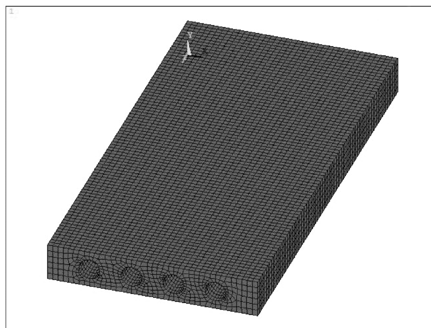


图 14-9 网格划分后

本阶段命令流如下。

```
/REPLOT                            ! 重新显示图像

! 网格划分
! 拾取板长边方向直线,并设置单元尺寸
LSEL,S,LOC,Z,1000
LESIZE,ALL,25,,
LSEL,ALL
! 拾取板短边方向直线,并设置单元尺寸
LSEL,S,LOC,X,500
LESIZE,ALL,25,,
LSEL,ALL
! 拾取板厚边方向直线,并设置单元尺寸
LSEL,S,LOC,Y,90
LESIZE,ALL,30,,
VSEL,ALL                           ! 选择板
VATT,1,1,1                         ! 为板赋属性
VSWEEP,ALL                         ! 扫掠划分板
FINISH                             ! 结束
```

14.1.3 加载及求解

（1）施加约束。

进入求解模块，对模型底面 Z = 1900 ~ Z = 2000 范围内的节点施加 UY 约束，对 Z = 0 ~ Z = 100 范围内的节点施加所有自由度的约束。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，依靠 Location 功能选取 Z = 0 ~ Z = 100 范围内的节点。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮。单击 Apply 按钮，弹出如图 14-10 所示 Apply U，ROT on Nodes 对话框中选择 All DOF，单击 OK 按钮，完成对所有自由度的约束。

相应的命令流如下：

```
/SOLU                              ! 进入求解模块
! 通过定位选择节点集
NSEL,S,LOC,Z,0,100                 ! 选择位于 Z =0,100 的节点
NSEL,R,LOC,Y,0                     ! 再筛选出其中 Y =0 位置的节点
! 约束自由度
D,ALL,ALL,                         ! 约束全部自由度
ALLSEL,ALL                         ! 选择所有对象
```

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，依靠 Location 功能选取 Z = 1900 ~ Z = 2000 范围内的节点。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮。单击 Apply 按钮，在弹出图 14-10 所示的 Apply U，ROT on Nodes 对话框中选择 UY，单击 OK 按钮，完成对 Y 方向自由度的约束。

相应的命令流如下：

```
NSEL,S,LOC,Z,1900,2000                   ! 定位选择节点集
NSEL,R,LOC,Y,0
```

```
D,ALL,UY                                  ! 约束 Y 向自由度
NSEL,ALL
```

约束效果如图 14-11 所示。

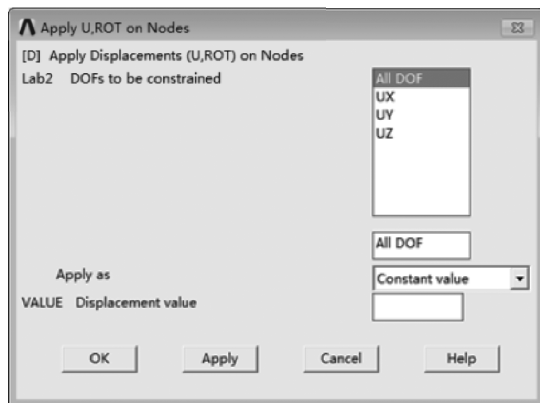


图 14-10 Apply U，ROT on Nodes 对话框

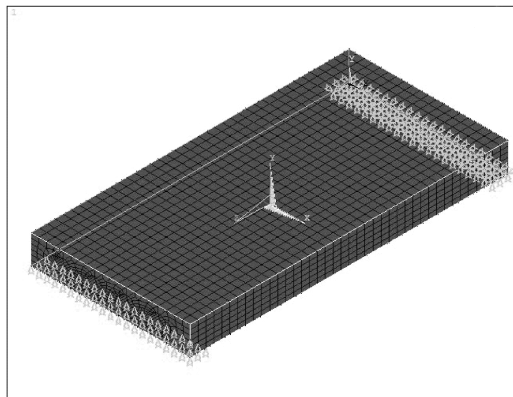


图 14-11 约束后的模型

（2）施加荷载。

本例以施加节点位移作为加载条件。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes 命令，拾取板的正中点，施加荷载 FY = －8000。加载模型如图 14-12 所示。

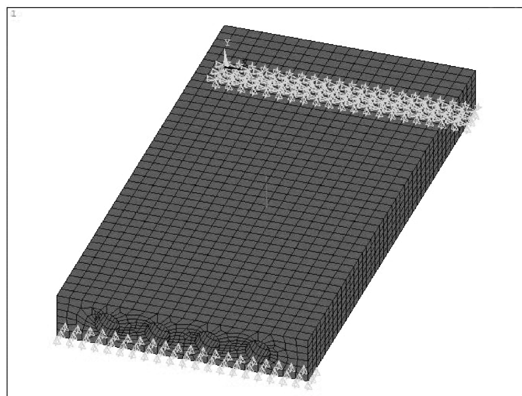


图 14-12 加载模型

以命令流形式加载：

```
! 定位施加荷载点
NSEL,S,LOC,Z,1000
NSEL,R,LOC,Y,180
NSEL,R,LOC,X,500
! 施加竖向荷载
F,ALL,FY,-8000
```

（3）设置求解项。

设置分析选项。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls

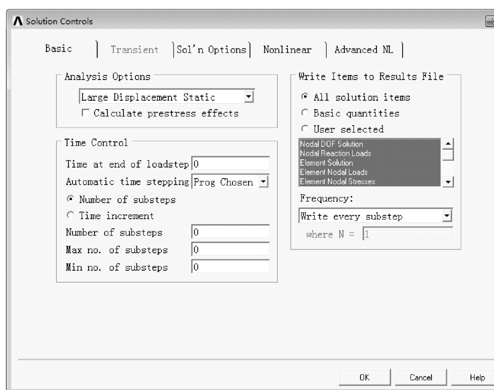
> Basic，弹出 Solution Controls 对话框（此时默认显示 Basic 选项卡），如图 14-13 所示。

在 Analysis Options 选项组的下拉列表框中选择 Large Displacement Static，在 Time Control 选项组中设置加载子步数为 100，在右侧的 Write Items to Results File 选项组中将输出频率设置为 Write every substep。

相应的命令流如下。

```
NLGEOM,ON                    ! 打开大变形
NSUBST,100                   ! 荷载子步数 100
```

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Nonlinear 命令，弹出 Solution Controls 对话框（此时默认显示 Nonlinear 选项卡），如图 14-14 所示。



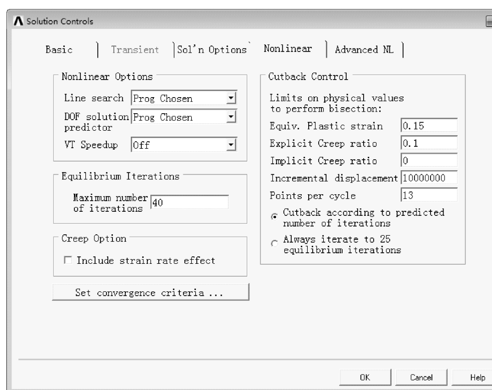


图 14-13　Solution Controls 对话框（Basic 选项卡）图 14-14　Solution Controls 对话框（Nonlinear 选项卡）

设置最大循环次数为 40。单击 Set convergence criteria 按钮，在弹出的对话框中单击 Replace 按钮，在弹出的 Nonlinear Convergence Criteria（非线性收敛准则）对话框中将 Tolerance about value 设置为 0.05，单击 OK 按钮完成设置。

相应的命令流如下。

```
OUTRES,ALL,ALL               ! 设置输出频率
NEQIT,40                     ! 迭代次数
PRED,ON
CNVTOL,F,,0.05,1             ! 设置收敛标准
```

（4）求解。

选择所有元素：Utility Menu > Select > Everything。

求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

14.1.4 后处理

（1）结构变形。

求解结束后，可得到结构竖向变形云图。在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape，得到 Y 方向云图，如图 14-15 所示。

命令流如下。

```
/POST1                       ! 进入通用后处理器
PLNSOL,U,Y,0,1               ! 绘制 Y 方向变形图
```

（2）第一主应力分布。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，在弹出的对话框中选择，单击 OK 按钮，即可查看第 1 主应力的分布情况，如图 14-16 所示。

命令流如下：

```
PLNSOL,S,1,0,1
```

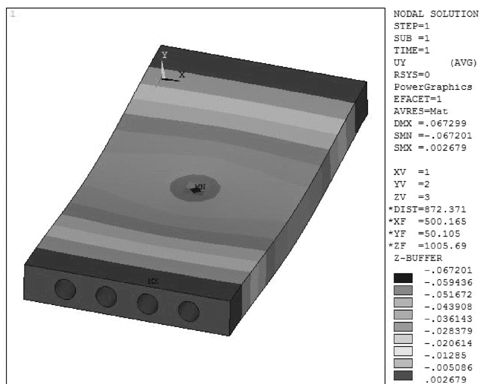


图 14-15　Y 方向变形云图

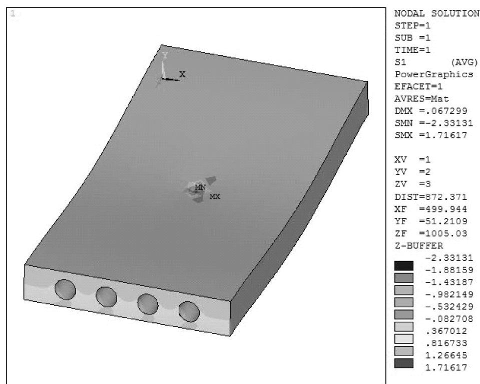


图 14-16　第 1 主应力云图

为了更清楚地看到板内部的主应力分布情况，可以通过设置使图像只显示等值线。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Device Options 命令，在弹出的对话框中[/DEVI]选中 Vector mode（wireframe）左侧的 On 复选框，再针对第 1 主应力绘图，即可得到如图 14-17 所示等值线图。

命令流如下：

```
/DEVICE,VECTOR,1
PLNSOL,S,1,0,1
```

同样，此时再查看板的变形情况，也是以等值线方式显示的，如图 14-18 所示。

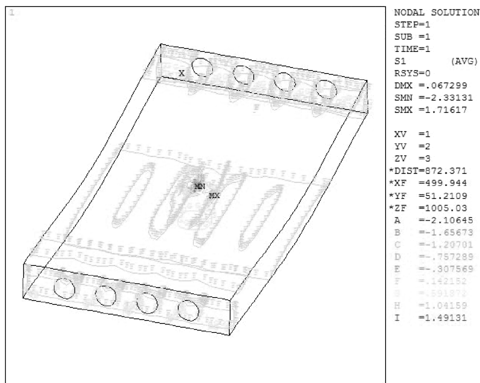


图 14-17　第 1 主应力等值线图

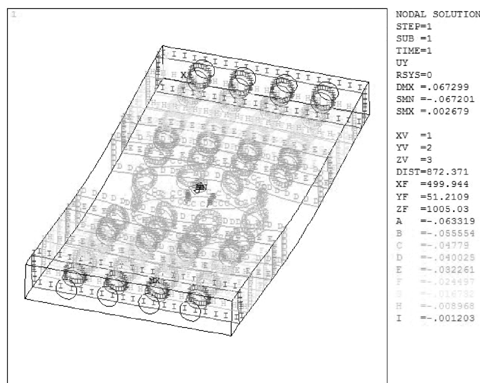
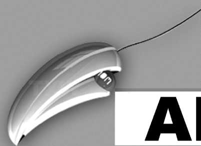


图 14-18　板的变形等值线图

命令流：

```
PLNSOL,U,Y,0,1
```



（3）等效应力分布情况。

通过路径 Main Menu > General Postproc > Element Table > Define Table，可以定义单元表。

执行上述路径，定义单元表 NMISC,5 为 seqv_i，即预定好了一个单元表。具体方法如下：

首先在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，通过弹出的对话框选择板单元为当前有效单元。

定义单元表。在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Element Table > Define Table 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，弹出 Define Additional Element Table Items 对话框，如图 14-19 所示。设置 Lab USer label for item 为 seqv_i，Item，Comp Results data item 为 By sequence num、NMISC,5。

再通过路径 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Elem Table，利用弹出的如图 14-20 所示 Contour Plot of Element Table Data 对话框绘制该单元表。

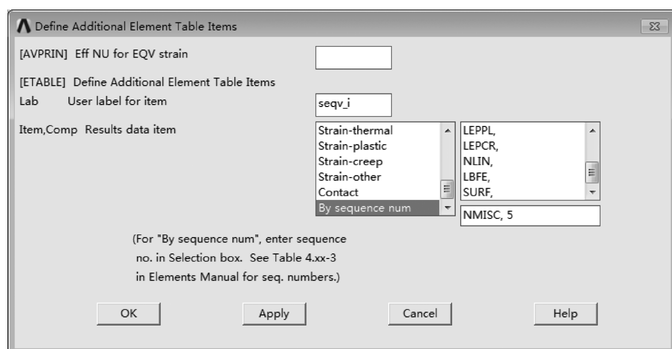


图 14-19 定义钢筋平均等效应力单元表

得到 SOLID 单元节点 I 的等效应力分布，如图 14-21 所示。

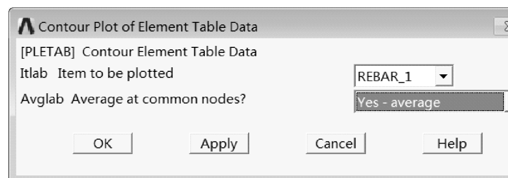


图 14-20 绘制单元表数据

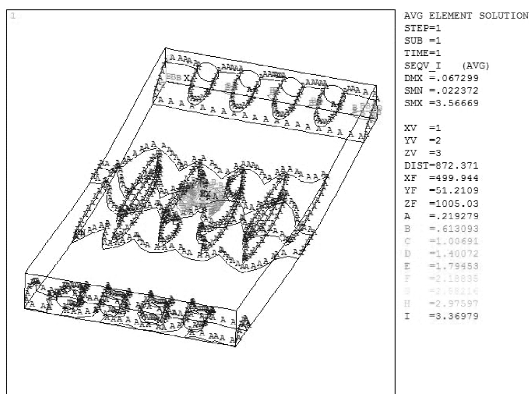


图 14-21 等效应力分布图

此处命令流较复杂，如下所示。

```
ETABLE,SEQV_I,NMISC,5
PLETAB,SEQV_I,AVG
```

（4）查看应变状态。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Device Options 命令，在弹出的对话框中取消选中 [/DEVI] Vector mode（wireframe）右侧的 On 复选框，可以重新恢复计算结果的云图视图显示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，在弹出的对话框中选择 Total mechanical strain，可以查看相应的应变状态。

命令流如下：

```
/DEVICE,VECTOR,0
PLNSOL,EPTO,1,0,1.0
PLNSOL,EPTO,INT,0,1.0                ! 关闭等值线显示
/DEVICE,VECTOR,1                     ! 第一主应变
PLNSOL,EPTO,1,0,1.0                  ! 应变密度
PLNSOL,EPTO,INT,0,1.0
```

得到第一主应变的云图，如图 14-22 所示；应变密度分布如图 14-23 所示。

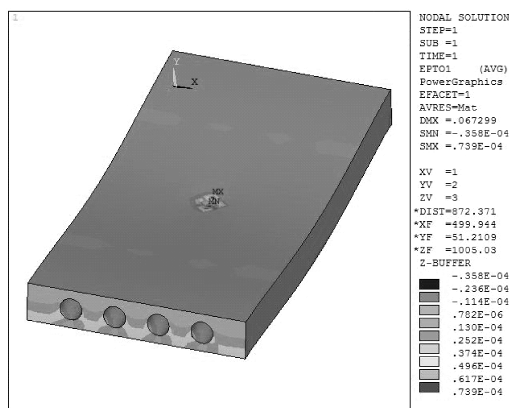


图 14-22 第一主应变云图

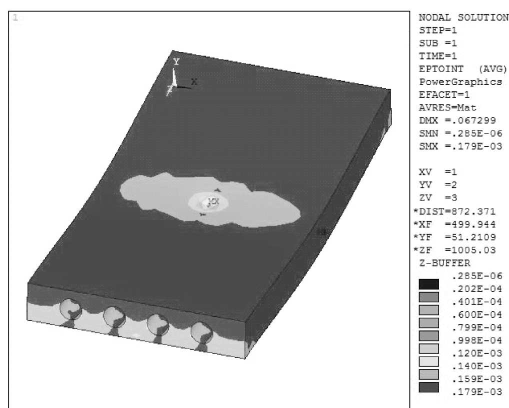


图 14-23 应变密度云图

得到第一主应变的等值线，如图 14-24 所示；应变密度等值线分布如图 14-25 所示。

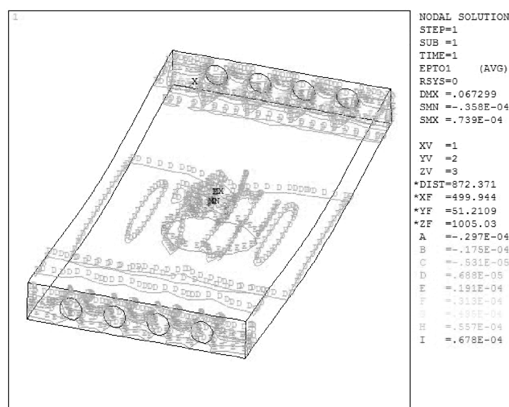


图 14-24 第一主应变等值线

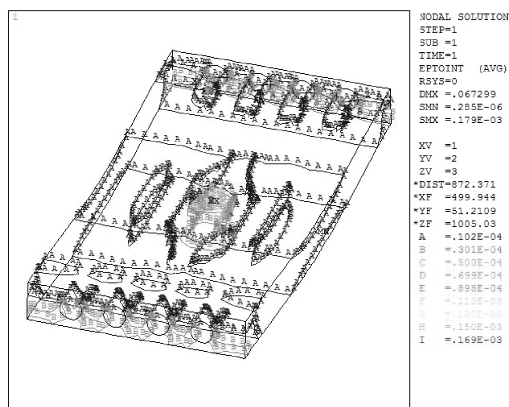


图 14-25 应变密度等值线

14.2 混凝土开裂

集中应力普遍存在于不规则的物质基质中，这将导致微裂缝的出现，同时随着裂缝持续增长会导致结构的破坏。混凝土结构在承重载荷下会形成局部张力，而在张力作用下，最初的裂缝在整个或部分构件中不断增长，最终会导致混凝土结构的破坏。

14.2.1 混凝土的裂缝模型

在钢筋混凝土结构的有限元分析中，常用的裂缝模型有弥散（分布）裂缝模型、离散（分离）裂缝模型、断裂力学模型。

（1）弥散裂缝模型：也被称为分布裂缝模型，其实质是将实际的混凝土裂缝“弥散”到整个单元中，将混凝土材料处理为各向异性材料，利用混凝土的材料本构模型来模拟裂缝的影响。这样，当混凝土某一单元的应力超过了开裂应力，则只需将材料本构矩阵加以调整，无需改变单元形式或重新划分单元网格，易于有限元程序实现，因此得到了非常广泛的应用。

（2）离散裂缝模型：也称分离裂缝模型，假定裂缝出现在单元边界上，将节点分离在裂缝两侧，一旦出现裂缝就增加新节点，重新划分单元，使裂缝总是处于单元和单元的边界。运用这一模型确定开裂深度时需要反复计算，其调整工作比较繁琐，对计算机的要求较高。本模型的优点是能较自然地描述裂缝的发生和扩展过程，并可计算出裂缝扩展深度。

此外，当大体积混凝土产生裂缝后，缝内将渗入水压。采用分离裂缝模型，可以在缝面上施加水压。其缺点是需预先知道裂缝的位置和走向，较难用于大体积混凝土的三维开裂分析。

（3）断裂力学模型：主要是考虑裂缝尖端应力集中对裂缝扩展的影响，它需要预先知道裂缝的位置，多用于混凝土结构裂缝扩展条件的分析和其他开裂问题中。

14.2.2 分析中用到的概念

（1）SOLID 65 单元。

ANSYS 中的 SOLID 65 单元是专为混凝土、岩石等抗压能力远大于抗拉能力的非均匀材料开发的单元类型，可以模拟材料的拉裂和压溃现象，使混凝土材料具有开裂、压碎、塑性变形和蠕变的能力。

（2）分析中所做的假设。

本例采用弥撒（分布）裂缝模型。在分析中做如下假设。

- 梁受弯矩作用发生变形，截面上的混凝土、钢筋等应变均符合平截面假定。
- 钢筋与混凝土无相对滑移，变形协调。
- 混凝土只能受压。

（3）应力释放。

在进行开裂模拟时，要用到应力释放。所谓应力释放（Stress Relief），是指物体内某一点的应力由于释放能量而降低的现象；确切地说是能量释放。受压开裂时，混凝土材料完全崩裂，应力骤然降为零。受拉破坏时，在垂直于裂缝的方向上应力骤然降为零。采取应力释放，即可区分混凝土是受压开裂还是受拉开裂。ANSYS 中提供了专门的应力释放控制功能。

14.2.3 问题描述

在本例中，单位均与毫米 mm、牛 N 的单位相适应，弯矩为 Nmm，弹性模量单位为 MPa。

（1）几何参数。

本例截取一段矩形截面钢筋混凝土梁。

截面尺寸高 600，宽 450，段长 150。

混凝土梁段截面图如图 14-26 所示。

（2）材料性能。

混凝土：EX = 20E3，μ = 0；钢筋选用 Φ12，其截面积 = 12 × 12 × PI/4 = 113.1。

钢筋：EX = 300E3，μ = 0.3。

（3）受力情况。

梁段所受弯矩 M = 600E3。

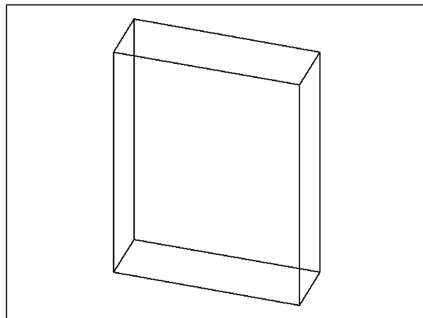


图 14-26　混凝土梁段截面图

14.2.4 前处理

（1）进入 GUI 界面。

启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Environment、Lisence、Working Directory，在 Job Name（项目名称）框中输入 concrete cracks。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。在 GUI 界面中选择 main menu > Preferences 命令，在弹出的对话框中选择 Structural。

（2）定义单元类型。

本例共 3 种单元类型。

- 混凝土采用钢筋混凝土工程中最为常用的 SOLID65 单元。
- 钢筋采用 LINK180 单元。
- 选用 PIPE16 单元来联系约束方程区域，以便相似的节点具有足够的转动空间。

设置方法如下。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，利用弹出的 Library of Element Types 对话框添加单元 SOLID65 为 1 号单元、LINK180 为 2 号单元。

在新版本的 ANSYS 中，PIPE16 已不在对话框中给出，用户可以在选择了 PIPE 单元后在右侧的输入框中直接输入它的编号 16，然后单击 OK 按钮即可，如图 14-27 所示。

相应命令流如下：

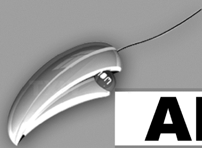
```
/PREP7                          ! 进入前处理模块
ET,1,SOLID65                    ! 定义单元 1 类型为 SOLID65
KEYOPT,1,5,2
ET,2,LINK180                    ! 定义单元 2 类型为 LINK180
ET,3,PIPE16                     ! 定义单元 3 类型为 PIPE16
```

（3）设置单元选项。

在 Element Types 对话框中，选择 SOLID65，单击 Options 按钮，在弹出的 SOLED65 element type options 对话框中设置 Concrete Linear Solu output K5 为 Nodal stress，Stress relax after cracking K7（即之前介绍的应力释放与否的设置）为 Exclude，如图 14-28 所示。

（4）定义实常数。

本例需要定义 3 个实常数。



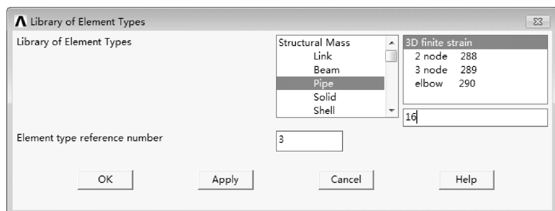


图 14-27 手动输入编号

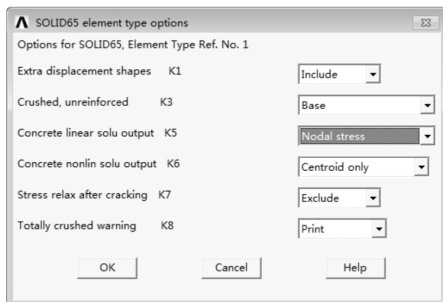


图 14-28 设置节点应力输出和应力释放

为保持材料编号统一，定义第 1 个实常数为空值。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，在弹出的对话框中选择 SOLID65，单击 OK 按钮，弹出 Real Set Number1 for SOLID65 对话框，直接单击 OK 按钮跳过。

定义第 2 个实常数：通过同样的路径打开 Real Constant Set Number 2，for LINK180 对话框，设置截面尺寸 AREA = 113.1，单击 OK 按钮。

定义第 3 个实常数：通过同样的路径打开 Real Constant Set Number 3，for PIPE16 对话框，在 Outerside diameter 框中输入 1，在 Wall thickness 框中输入 0.5，单击 OK 按钮，完成实常数设置。

相应命令流如下：

```
R,1
R,2,113.1
R,3,1,0.5
```

（5）定义材料属性。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

先定义混凝土。在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的对话框中设置混凝土 EX 为 20e3、PRXY 为 0。

接下来，在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Nonlinear > Inelastic > Non - metal Plastic > Concrete，在弹出的对话框中设置 Uniaxial Crushing Stress 为 -1（即关闭压碎），其余保持默认。

最后，定义钢筋的弹性模量及泊松比，方法同混凝土，设置 EX 为 300e3、PRXY 为 0.3。

此处可以使用命令流操作，方便且便于修改。具体如下。

```
MP,EX,1,20E3                    ! 定义混凝土材料
MP,PRXY,1,0
TB,CONC,1
TBDATA,,,,,-1
MP,EX,2,300E3                   ! 定义钢筋材料
MP,PRXY,2,0.3
```

（6）建立几何模型。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By 2 Corners & Z，在弹出的对话框中设置 Width = 450，Height = 600，Depth = 150。单击 OK 按

钮，完成长方体几何模型的建立，如图 14-29 所示。

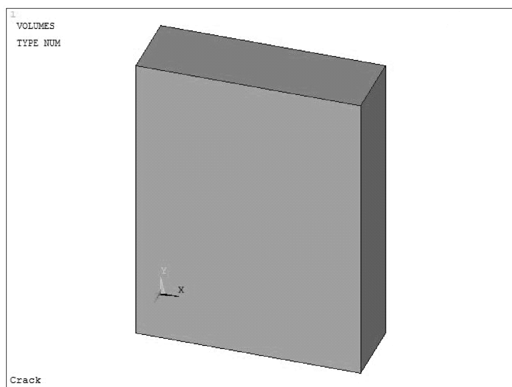


图 14-29　梁段几何模型

（7）划分网格。

① 划分钢筋网格。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool 命令，在弹出的 MeshTool 对话框中单击 Element Attributes 选项组中的 Set 按钮，进行材料特性设置，选择 TYPE 为 2。再在 Size Controls 选项组中单击 Lines 右侧的 Set 按钮，拾取侧边 L9 和 L10，单击 OK 按钮，在弹出的尺寸控制对话框中设置 NDIV = 1，即只划分为 1 份。

选择直线及为其设置参数的命令流如下。

```
/PNUM,LINE,1                 ! 显示线元素编号
LSEL,S,,,9,10                ! 拾取线 9,10
TYPE,  2                     ! 为当前直线赋单元类型
MAT,       2                 ! 为当前直线赋材料类型
REAL,       2                ! 为当前直线赋实常数
LESIZE,ALL,,,1               ! 控制直线划分份数
```

单击 OK 按钮，完成设置。回到 MeshTool 对话框，在 Mesh 下拉列表框中选择 Lines，单击 Mesh 按钮，完成划分。

命令流：

```
LMESH,ALL
```

② 划分虚拟单元网格。

操作步骤和划分钢筋时相同，在设置材料特性时，TYPE 选为 3，MAT = 1，REAL = 3，单击 OK 按钮。在 Size Controls 选项组中单击 Lines 右侧的 Set 按钮，拾取侧边 L6 和 L8，单击 OK 按钮，在弹出的尺寸控制对话框中设置 NDIV = 4。其余同上，完成划分。

③ 划分体网格。

设置 TYPE 为 1，MAT = 1，REAL = 1，单击 OK 按钮。

相应命令流如下。

```
ALLSEL
TYPE,1
MAT, 1
REAL,1
```

在 Size Controls 选项组中单击 Lines 右侧的 Set 按钮，拾取 L4、L5、L26 和 L7，单击 OK 按钮，在弹出的尺寸控制对话框中设置 NDIV = 1。

```
LSEL,S,,,4,5
LESIZE,ALL,,,1
ALLSEL
```

设置划分对象为 Volumes（体），网格形状为 Hex，划分方式选择 Mapped，单击 Mesh 按钮，完成划分。

划分体的命令流如下。

```
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
FINISH
```

划分后的结果如图 14-30 所示。

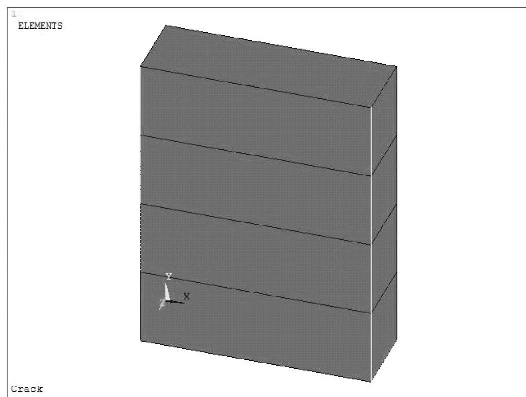


图 14-30 有限元模型

14.2.5 加载和求解

（1）建立约束方程。

为了实现平截面假定，同时使节点能够有转动自由度，需要在截面上的节点建立约束方程。

在 ANSYS 中可以由用户自己添加约束方程，方法如下。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Coupling / Ceqn > Constraint Eqn 命令，弹出 Define a Constraint Equation（约束方程定义）对话框，如图 14-31 所示。在各输入框中分别输入所定义的约束及其系数，然后单击 OK 按钮即可。

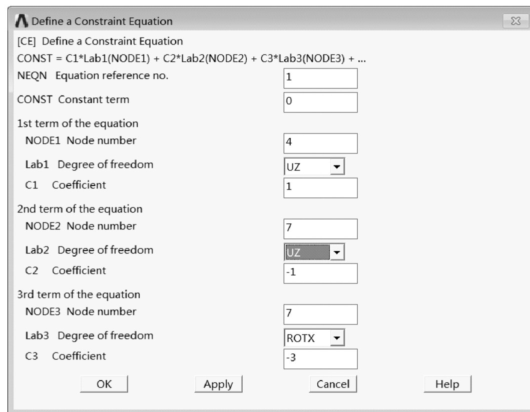


图 14-31 Define a Constraint Equation 对话框

本例中，需要定义的数据依次如下，只要按顺序输入对话框即可。

- 第 1 个方程：1，0，4，UZ，1，7，UZ，－1，7，ROTX，－3。
- 第 2 个方程：2，0，6，UZ，1，7，UZ，－1，7，ROTX，－1.5。
- 第 3 个方程：3，0，8，UZ，1，7，UZ，－1，7，ROTX，1.5。
- 第 4 个方程：4，0，5，UZ，1，7，UZ，－1，7，ROTX，3。
- 第 5 个方程：5，0，1，UZ，1，11，UZ，－1，11，ROTX，－3。
- 第 6 个方程：6，0，12，UZ，1，11，UZ，－1，11，ROTX，－1.5。
- 第 7 个方程：7，0，10，UZ，1，11，UZ，－1，11，ROTX，1.5。
- 第 8 个方程：8，0，9，UZ，1，11，UZ，－1，11，ROTX，3。

由于采用命令流方式，可以使用复制、粘贴等操作，因此在有重复操作的部分，建议尽量使用命令流方式。相应的命令流如下。

```
/PREP7
! 定义 8 个约束方程
CE,1,0,4,UZ,1,7,UZ,-1,7,ROTX,-3,
CE,2,0,6,UZ,1,7,UZ,-1,7,ROTX,-1.5,
CE,3,0,8,UZ,1,7,UZ,-1,7,ROTX,1.5,
CE,4,0,5,UZ,1,7,UZ,-1,7,ROTX,3,
CE,5,0,1,UZ,1,11,UZ,-1,11,ROTX,-3,
CE,6,0,12,UZ,1,11,UZ,-1,11,ROTX,-1.5,
CE,7,0,10,UZ,1,11,UZ,-1,11,ROTX,1.5,
CE,8,0,9,UZ,1,11,UZ,-1,11,ROTX,3,
```

（2）施加约束。

进入求解模块 Solution。

① 设模型后立面为固定面，即在 Z＝0 平面上约束全部自由度。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框。拾取对象选择 Nodes，拾取方式选择 By Location，选中 Z Coordinates 单选按钮，在输入框中输入 0，单击 OK 按钮，完成节点的选择。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，在弹出的对话框中选择 All DOF，单击 OK 按钮，约束效果如图 14-32 所示。

相应命令流如下。

```
NSEL,,LOC,Z,0
D,ALL,ALL
```

② 在 Z＝150 面上施加 Y 和 Z 方向的旋转约束。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities，拾取 Z＝150 的所有节点，方法同 Z＝0 截面节点的拾取。

命令流如下。

```
NSEL,,LOC,Z,150
```

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，在弹出的对话框中选择 ROTY 和

ROTZ，单击 OK 按钮。

相应命令流如下。

```
D,ALL,ROTY
D,ALL,ROTZ
```

（3）施加弯矩。

在 Z＝150 截面上的节点 7 和节点 11 上各施加 X 方向的弯矩 300E3。在 GUI 界面中选择 Main Menu＞Solution＞Define Loads＞Apply＞Structural＞Force/Moment＞On Nodes 命令，拾取节点 7 和节点 11，单击 OK 按钮，在弹出的对话框中设置 Lab Direction of force/mom 为 MX，在 VALUE Force/moment value 框中输入 300E3，单击 OK 按钮，施加弯矩效果如图 14-33 所示。

命令流如下。

```
F,7,MX,300E3
F,11,MX,300E3
```

（4）设置求解选项。

打开自动时间步开关，将分析子步数设置为 5。在 GUI 界面中选择 Main Menu＞Solution＞Analysis Type＞Sol'n Controls＞Basic 命令，在弹出的对话框中将 Automatic time stepping 设置为 Prog Chosen，将 Number of substeps 设置为 5。

（5）求解。

设置完毕后，通过路径 Main Menu＞Solution＞Solve＞Current LS 开始求解。

命令流如下。

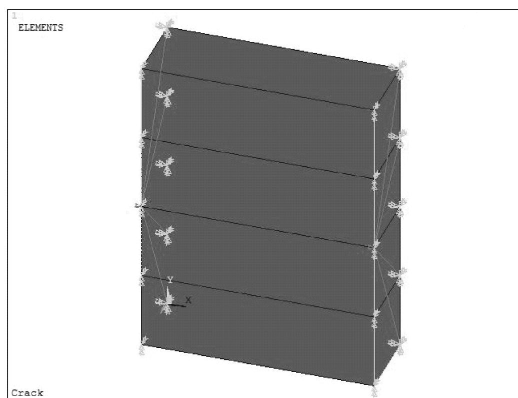


图 14-32　对 Z＝0 面施加全约束

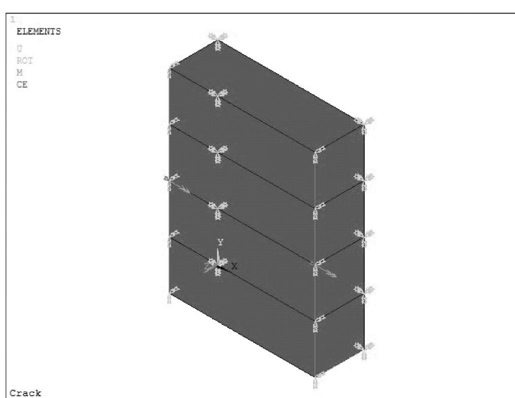


图 14-33　施加弯矩

```
NSUBST,5,0,0                 ! 设置分析子步数
AUTOTS,1                     ! 激活自动时间步长
SOLVE                        ! 求解
FINI
```

14.2.6 计算结果分析

（1）混凝土的应力分析。

梁在弯矩作用下产生应力，其中压应力由混凝土承担，拉应力由钢筋承担。

先获取计算数据。通过路径 Main Menu > General Postproc > Read Results > Last Set，获取混凝土最大压应力值。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data > Results Data > Nodal Results 命令，在弹出的对话框中设置参数名为 SCON，单元号为混凝土截面节点号 17，选择 Stress > SZ。

获取数据命令流如下：

```
/POST1
SET,LAST
*GET,SCON,NODE,17,S,Z
```

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Elems，在弹出的对话框中设置单元号为 1，在下拉列表框中选择 ST。

命令流如下：

```
ETAB,ST,LS,1,,
```

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data > Results Data > Elem table data 命令，在弹出的对话框中设置自定义标签为 STL，单元号为 1，在下拉列表框中选择 ST。

命令流如下。

```
ETAB,ST,LS,1
ESORT,ST
```

显示数据。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters 命令，在弹出的 Scalar Parameters 对话框中显示出钢筋抗拉应力和混凝土抗压应力，如图 14-34 所示。

命令流如下。

```
*GET,STL,SORT,,MAX
*STATUS,PARM
```

绘制截面法向应力云图。在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Nodal Solu 命令，在弹出的对话框中选择 Stress > Z - Component of stress，单击 OK 按钮，结果如图 14-35 所示。

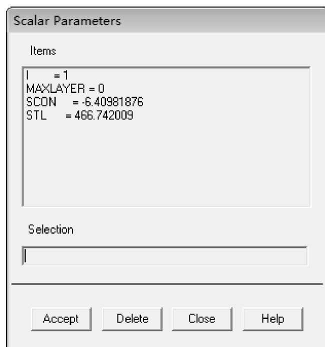


图 14-34　标量参数结果

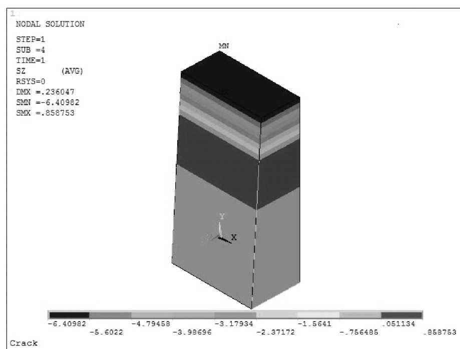


图 14-35　Z 向应力云图

（2）混凝土的变形及应变分析。

绘制截面变形图。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deform Shape 命令，在弹

出的对话框中选中 Def + undef edge 单选按钮，单击 OK 按钮，得到如图 14-36 所示变形图。

绘制截面 Z 向变形云图。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu，在弹出的对话框中选择 DOF Solution > Z – Component of displacement，单击 OK 按钮，结果如图 14-37 所示。



图 14-36 变形图

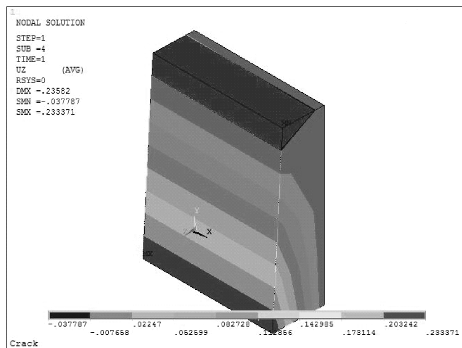


图 14-37 Z 向变形云图

查看应变云图。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，在弹出的对话框中选择 Total Mechanical Strain，单击 OK 按钮可以查看相应的应变状态。

选择 1st Principal Total Mechanical Strain，单击 OK 按钮，得到第 1 主应变云图，如图 14-38 所示。

选择 Total Mechanical Strain Intensity，单击 OK 按钮，得到应变密度云图，如图 14-39 所示。

读取应变的命令流如下：

```
PLNSOL,U,Z,0,1
PLNSOL,EPTO,1,0,1.0
PLNSOL,EPTO,INT,0,1.0
```

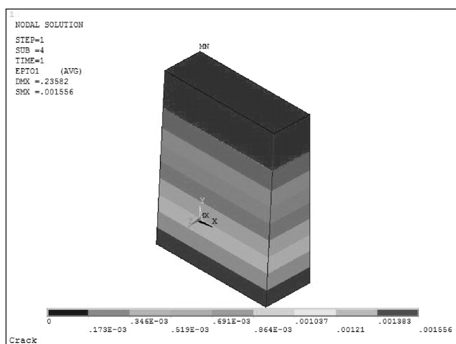


图 14-38 第 1 主应变云图

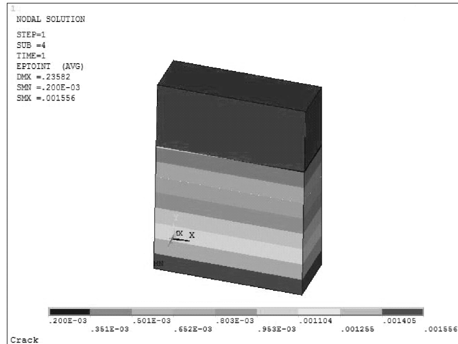


图 14-39 应变密度云图

（3）混凝土开裂。

观察开裂情况。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > PlotCtrls > Device Options 命令，在弹出的对话框中选中［/DEVI］ Vector mode（wireframe）右侧的 On 复选框，以观察内部裂纹情况。

通过路径 Main Menu > General Postproc > Plot Results > ConcPlot > Crack/Crush 查看裂纹情况，如图 14-40 所示。

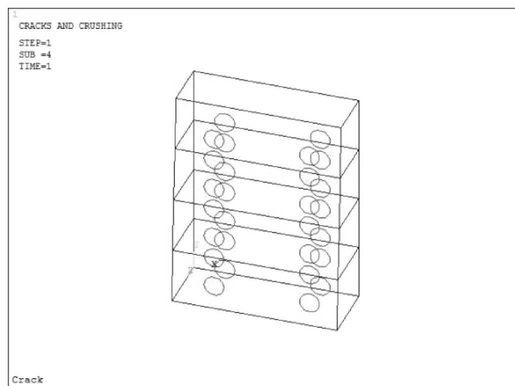


图 14-40　混凝土开裂

查看裂纹的命令流如下。

```
/DEVICE,VECTOR,1
PLCRACK
FINISH
```

14.3　本章小结

本章首先对钢筋混凝土板进行了建模及静力学分析。通过学习，相信读者已经掌握了混凝土的常用单元类型及建模方法。

然后对钢筋混凝土梁中的一小段进行了混凝土开裂分析。通过实例分析，讲述了材料开裂问题的分析方法。

第 15 章 钢结构及钢筋混凝土结构分析

结构体系是指结构抵抗外部作用的构件组成方式。本章将对土木工程中常见的钢结构及钢筋混凝土结构体系的典型形式进行建模分析，以帮助读者熟悉不同结构体系的建模方法。

本章学习目标

- 掌握钢结构的常用单元类型
- 掌握钢筋混凝土框架结构的快捷建模方法

15.1 钢结构排架受力分析

钢结构是用钢质材料组成的结构，是主要的建筑结构类型之一。本节将对钢结构的典型形式——排架结构进行建模及受力分析。

15.1.1 钢材特点

钢材的特点是强度高、自重轻、刚度大，故用于建造大跨度和超高、超重型的建筑物特别适宜；材料匀质性和各向同性好，属理想弹性体，最符合一般工程力学的基本假定；材料塑性、韧性好，可有较大变形，能很好地承受动力荷载。

15.1.2 问题简述

如图 15-1 所示排架结构尺寸为 12 m × 10 m × 9 m，弹性模量 E = 2.06E5，泊松比 μ = 0.3，材料质量密度 ρ = 7.85E - 9。

（1）单元类型、实常数和截面类型。

单元类型：BEAM188。

各构件形状及尺寸：

- 主立柱：钢管 Φ180 × 10，Ri = 80 mm，R0 = 90 mm。
- 大横梁：工字钢 210 × 180 × 8 × 20。
- 屋顶各梁：工字钢 150 × 100 × 6 × 10。
- 屋顶梁支撑：钢管 Φ50 × 8，Ri = 17 mm，R0 = 25 mm。

（2）荷载值。

竖向荷载：

- 屋顶角节点荷载 1.5 kN。

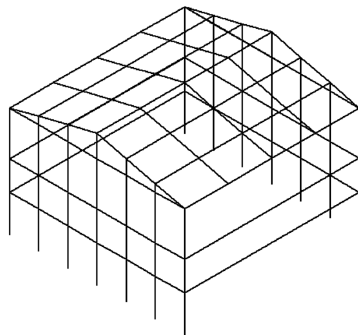


图 15-1 排架几何模型

- 边上节点荷载 F/2 = 3 kN。
- 中间节点荷载 6 kN。

水平荷载：

- 立面角节点荷载 1 kN。
- 边上节点荷载 2 kN。
- 中间节点荷载 4 kN。

加速度荷载 ACEL 分项值：0，-13000，5000（mm/s^2）。

（3）边界条件。

钢框架与地接连的整个方向位移和转角全约束。

15.1.3 前处理

本模型节点多，但是符合一定规律，所以要多运用图形的复制和镜像功能，以简化操作步骤。

启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Environment、Lisence、Working Directory（工作目录）和 Job Name（项目名称）。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preferences 命令，在弹出的对话框中选中 Structural。

（1）定义单元类型。

在 GUI 界面中选择 Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，利用弹出的对话框添加 BEAM188 单元。

相应命令流如下。

```
/CLEAR
! 进入前处理模块
/PREP7
! 定义单元
ET,1,BEAM188
```

（2）设置截面特性。

设置截面属性，主要是对应用 BEAM188 的各主梁柱进行截面尺寸设定。

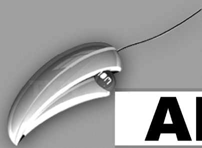
在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Beam > Common Sections 命令，打开 Beam Tool 对话框。

下面进行详细设置说明。

已知钢管尺寸为 Φ180 × 10，Ri = 80 mm，R0 = 90 mm，因此在 Beam Tool 对话框中进行相应的设置，如图 15-2 所示。大横梁为工字钢 210 × 180 × 8 × 20，设置如图 15-3 所示。

相应命令流如下。

```
! 定义截面
SECTYPE,   1,BEAM,CTUBE,,0                ! 定义圆管型
SECOFFSET,CENT
SECDATA,80,90,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE,   2,BEAM,I,,0                    ! 定义工字钢
SECOFFSET,CENT
SECDATA,180,180,210,8,8,20,0,0,0,0
```



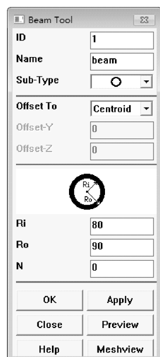


图 15-2 定义钢管

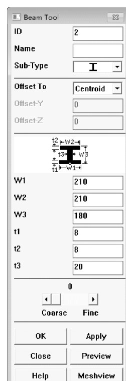


图 15-3 定义工字钢

同理，对其他截面进行设置。参数如下。

屋顶各梁：工字钢 150×100×6×10。

屋顶梁支撑：钢管 Φ50x8，Ri =17 mm，R0 =25 mm。

命令流如下。

```
SECTYPE,   3,BEAM,I,,0                        ! 定义工字钢
SECOFFSET,CENT
SECDATA,100,100,150,6,6,10,0,0,0,0
SECTYPE,   4,BEAM,CTUBE,,0                    ! 定义圆管型
SECOFFSET,CENT
SECDATA,17,25,0,0,0,0,0,0,0,0
```

（3）定义材料属性。

在 GUI 界面中选择 Main Menu Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的对话框中设置弹性模量 E =2.06E5，泊松比 μ =0.3，材料质量密度 ρ =7.85E −9。

（4）建立几何模型。

以框架前角柱上的点为起始点，坐标如下。

```
K,1,0,0,5000
K,2,0,3000,5000
K,3,0,6000,5000
K,4,0,7500,5000
```

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS，依次建立上述 4 点，如图 15-4 所示。

依次拾取各点，连接成线。路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Lines。

先连竖向直线，如图 15-5 所示。

在合理设定关键点编号次序的情况下，可以使用命令流中的 * DO 循环语句快捷地生成多段直线。命令流如下。

```
! 利用循环语句生成直线
*DO,I,1,3,1                         ! 开始循环
    LSTR,I,I+1,                     ! 循环对象:生成直线的命令
*ENDDO                              ! 循环结束
```

由于各立柱及柱间悬索等距排列，几何模型相同，因此直接用复制命令来完成。



图 15-4　生成 4 个关键点

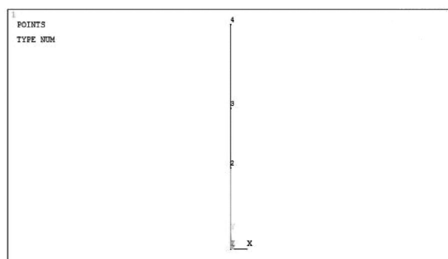


图 15-5　生成第 1 列直线

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Lines 命令，弹出 Copy Lines 对话框，如图 15-6 所示。

拾取需要复制的直线，并设定好份数（包括本身）和平移。

本例复制 6 份，包括本身则为 7 份。每一部分相距 2 m，本例单位取毫米，因此在 DX X-offset in active CS 框中输入 2000。单击 OK 按钮，生成如图 15-7 所示 7 组直线。

复制命令如下。

```
LGEN,7,1,3,,2000,,,,0,0
```

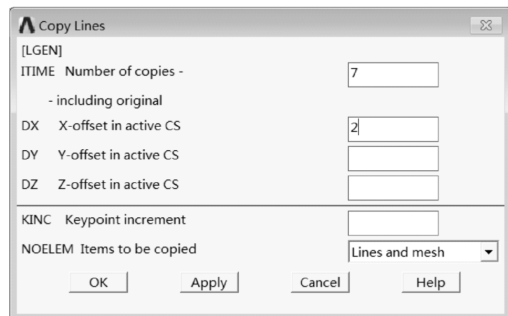


图 15-6　Copy Lines 对话框

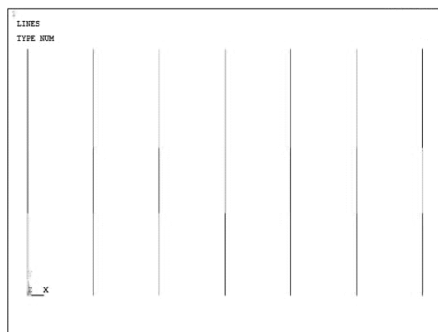


图 15-7　复制好的 7 组直线

复制好的直线及关键点将依次被自动编号。用户可通过路径 Utility Menu > Plotctrls > Numbering 对点和线的编号显示与否进行设置。

接下来，生成水平直线。

模型底边为接地端，所以不用连接。依次连接关键点 2、6、10 直至关键点 26 所在的直线，生成一条直线。注意此处是 6 条线段，不是一条。同样生成其余各水平方向直线。

建立屋架上弦各点。

```
K,29,2000,8000,5000
K,30,4000,8500,5000
K,31,6000,9000,5000
```

```
K,32,8000,8500,5000
K,33,10000,8000,5000
```

将屋架上弦各点连接成线，如图 15-8 所示。将生成的屋架向 Z 向复制 3 份，即设置 ITIME 为 4。复制屋架方法同复制竖向直线，效果如图 15-9 所示。

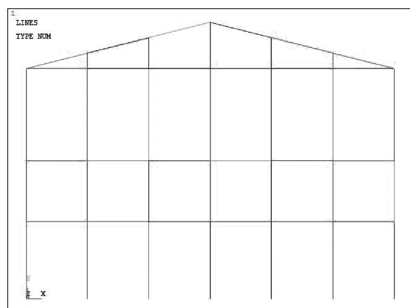


图 15-8 正立面框架和屋架

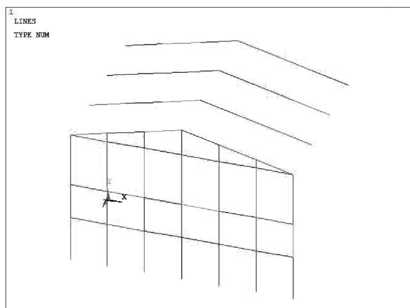


图 15-9 复制屋架

对第 1 榀框架进行镜像，生成房屋背面的框架。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Lines 命令，在弹出的对话框中选择 min,max,inc 选项（由于直线数量较多），输入最小直线编号 1，最大编号 50，默认增量步长 1。单击 OK 按钮，出现镜像设置对话框，选择 XY 平面为镜像面。镜像效果如图 15-10 所示。

镜像命令如下。

```
LSYMM,Z,1,50
```

连接前后排架间相应关键点，完成几何模型的建立。连接前后排架命令流如下。

```
*DO,I,29,33,1
    LSTR,I,I+6,
*ENDDO
*DO,I,34,47,1
    LSTR,I,I+7,
*ENDDO
*DO,I,49,53,1
    LSTR,I,I+34,
*ENDDO
```

最后生成全图，如图 15-11 所示。

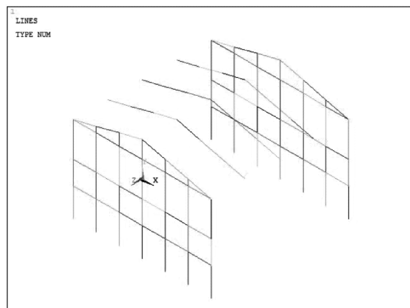


图 15-10 镜像后的直线

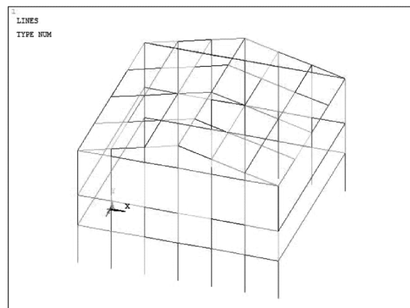


图 15-11 几何模型全图

（5）网格划分及赋予属性。

本例中各直线段为一个单元即可，主要是赋予材料及相应的属性。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool 命令，在弹出的 MeshTool 对话框中单击 Lines 右侧的 Set 按钮，拾取 6 根主立柱。在弹出的 Line Attributes 对话框中设置相应的材料属性，如图 15-12 所示。单击 OK 按钮，完成立柱的赋属性。

相应命令流如下。

```
LSEL,S,,,1,3                           ! 选择所有立柱
LSEL,A,,,10,12
LSEL,A,,,19,21
LSEL,A,,,48
LSEL,A,,,87,89
LSEL,A,,,78,80
LSEL,A,,,116
LSEL,A,,,69,71
CM,LIZHU,LINE                 ! 创建立柱集合
CMSEL,S,LIZHU                 ! 选中立柱集合
LATT,1,1,1                    ! 为集合内所有立柱赋属性
LESIZE,LIZHU,,,1,,,,,1        ! 网格尺寸控制
LMESH,ALL                     ! 划分网格
```

完成其他梁、杆的属性设置及网格划分。

划分主次梁单元：

```
! 主梁
LSEL,S,,,34,45
LSEL,A,,,102,113
……
CM,ZHULIANG,LINE
CMSEL,S,ZHULIANG
LATT,1,1,1,,,,2
LESIZE,ZHULIANG,,,1,,,,,1
! 次梁
LMESH,ALL
LSEL,S,,,119,123                ! 选择直线
LSEL,A,,,125,129                ! 向集合内添加新直线
……
LSEL,U,,,140                    ! 剔除多选的直线
CM,CILIANG,LINE
CMSEL,S,CILIANG
LATT,1,1,1,,,,3
LESIZE,CILIANG,,,1,,,,,1
LMESH,ALL
! 连杆
LSEL,S,,,4,18
LSEL,U,,,10,12
……
LSEL,A,,,90,101
CM,LIANGAN,LINE
CMSEL,S,LIANGAN
LATT,1,1,1,,,,4
LESIZE,LIANGAN,,,1,,,,,1
LMESH,ALL
FINISH                          ! 退出前处理模块
```

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plotctrls > Style > Size and Shape 可以显示单元的属性特征，如图 15-13 所示。

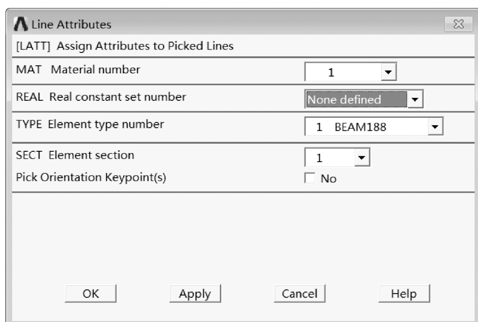


图 15-12 属性赋予

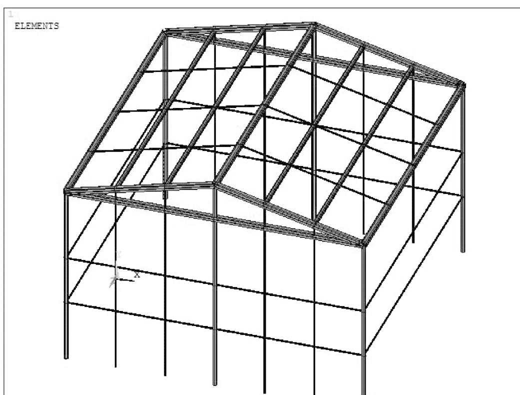


图 15-13 显示单元形状

屋架与柱连接处局部放大图如图 15-14 所示，屋架局部放大图如图 15-15 所示。

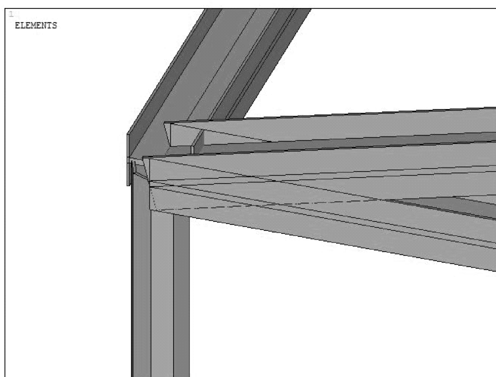


图 15-14 屋架与柱连接处局部放大图

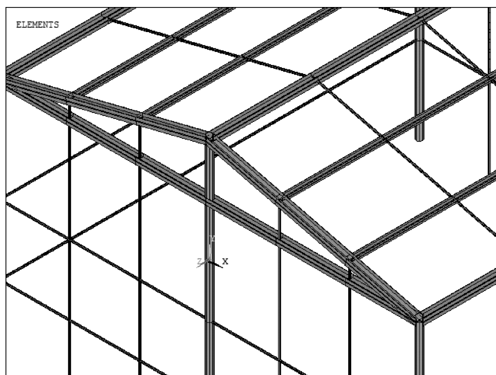


图 15-15 屋架局部放大图

15.1.4 加载及求解

（1）施加约束。

对所有柱子的柱脚施加全方位约束。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，拾取所有需要约束的节点，单击 OK 按钮，在弹出的对话框中选择 ALL DOF，将 VALUE Displacement Value 设置为 0。

约束后的模型如图 15-16 所示。

命令流如下。

```
! 进入求解模块                    ! 选择要约束的点
/SOLU
! 施加约束
NSEL,S,,,1,9,4,,                  ! 选择施加约束的点
```

```
NSEL,A,,,14,22,4,,
NSEL,A,,,64,85,3,,
D,ALL,ALL,0                    ! 约束
```

（2）施加水平荷载。

立面角节点荷载为1 kN，边上节点荷载为2 kN，中间节点荷载为4 kN。

对前立面的两个上角点施加节点荷载1 kN。通过路径 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes，拾取节点4和28，单击OK按钮。施加沿Z方向的荷载，值为 -1000。

对立面边缘施加沿Z方向的荷载，值为 -2000。

拾取其余立面中间各点，施加沿Z方向的荷载，值为 -4000。

施加Z方向荷载的命令流如下。

```
NSEL,S,,,4,                    ! 选择要施加荷载的点
NSEL,A,,,12,
F,ALL,FZ,-1000                 ! 施加荷载
NSEL,S,,,2,3
NSEL,A,,,10,11
NSEL,A,,,13
NSEL,A,,,31,34
F,ALL,FZ,-2000
NSEL,S,,,6,8
NSEL,A,,,27,30
NSEL,A,,,65,66
NSEL,A,,,68,69
NSEL,A,,,71,72
NSEL,A,,,74,75
F,ALL,FZ,-4000
NSEL,S,,,4,
NSEL,A,,,12,
NSEL,A,,,17,
NSEL,A,,,25,
```

（3）施加竖向荷载。

屋顶角节点荷载1.5 kN，边上节点荷载3 kN，中间节点荷载6 kN。

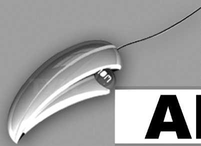
对节点4、28、58、82施加沿Y方向的竖向荷载，值为 -1500。

对边缘处除上述节点外，施加沿Y方向的竖向荷载，值为 -3000。

对屋面中间各节点施加沿Y方向的竖向荷载，值为 -6000。

施加Y方向荷载的命令流如下。

```
NSEL,S,,,4,
NSEL,A,,,12,
F,ALL,FY,-1500                   ! 施加荷载
NSEL,S,,,39,42
NSEL,A,,,26
……
NSEL,U,,,50
F,ALL,FY,-3000
NSEL,S,,,52,63
NSEL,A,,,43
NSEL,A,,,46
```



```
NSEL,A,,,50
F,ALL,FY,-6000
```

施加完荷载后模型如图 15-17 所示。

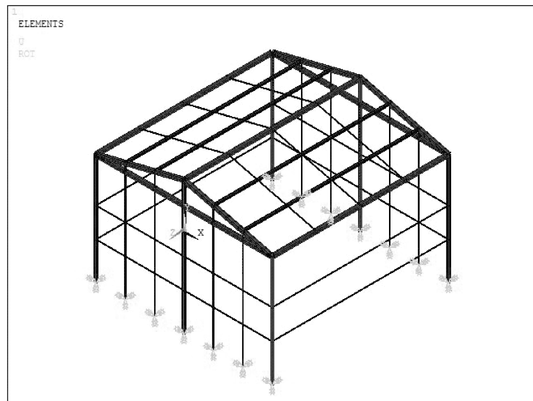


图 15-16 施加约束

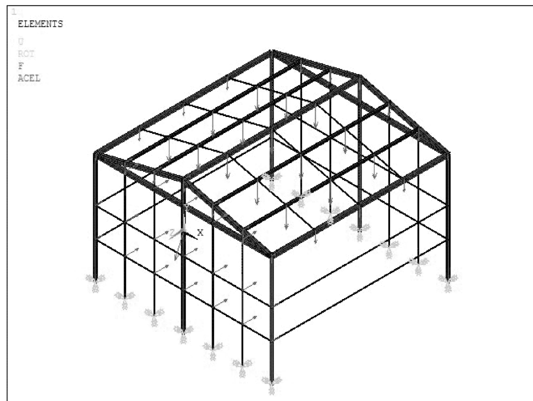


图 15-17 施加完整荷载

（4）加速度荷载。

对模型施加各方向的加速度荷载。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Gravity > Global 命令，弹出 Apply （Gravitational） Acceleration 对话框，设置如图 15-18 所示。

施加加速度荷载命令流如下。

```
ACEL,0,-13000,5000,
ALLSEL
```

（5）设置分析类型及相关选项。

首先设置分析类型为静力学分析。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，在弹出的对话框中选中 Static 单选按钮，单击 OK 按钮。

接下来，进行相关分析选项的设置。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol' n Controls > Basic 命令，弹出 Solution Controls 对话框，设置如图 15-19 所示。

（6）求解。

设置全部完成后，通过路径 Main Menu > Solution > Solve 进行求解。

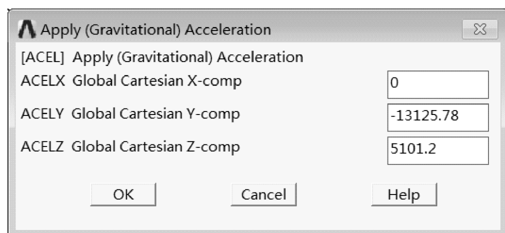


图 15-18 设置加速度

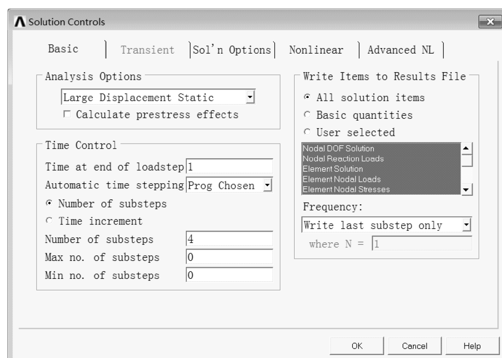


图 15-19 求解设置

命令流如下。

```
！进入求解模块
/SOLU
！设置求解项
ANTYPE,0                    ！分析类型
NLGEOM,1                    ！打开大变形分析
NSUBST,4,0,0                ！设置子步
TIME,1                      ！设置加载时间步长
/STATUS,SOLU
SOLVE                       ！开始求解
FINISH
```

15.1.5 后处理

求解完成后，进入后处理。

（1）查看平动变形情况。

通过以下路径查看结构变形及应变情况。

- Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu。
- Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape。

命令流如下。

```
/POST1                      ！进入通用后处理器
PLDISP,2                    ！绘制变形图
PLNSOL,U,X,0,1              ！绘制平动位移云图
PLNSOL,U,Y,0,1
PLNSOL,U,Z,0,1
PLNSOL,U,SUM,0,1
```

如图 15-20 所示，结构最大变形 331.948（单位为 mm，下同）。如图 15-21 所示为结构的 X 方向变形云图，如图 15-22 所示为结构的 Y 方向变形云图，如图 15-23 所示为结构的 Z 方向变形云图。

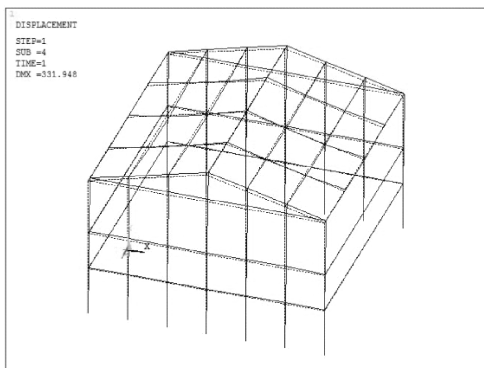


图 15-20 总变形图

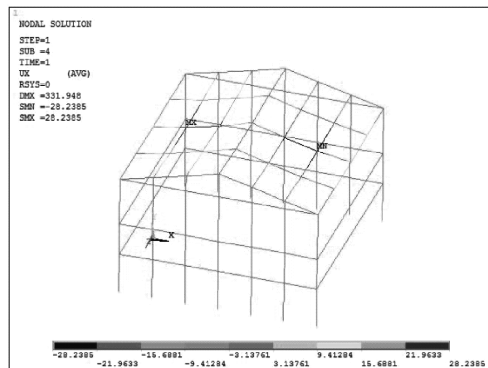
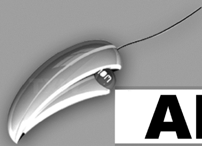


图 15-21 UX 云图

X 方向最大变形 UX = 28.2385；Y 方向最大变形 UY = －211.539；Z 方向最大变形 UZ = －280.154。

由以上各图可见，沿 Z 轴方向变形最大，且变形主要发生在屋顶架的次梁。



（2）查看转动变形。

查看转动变形命令流如下。

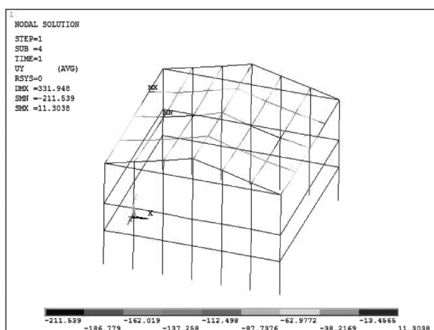


图 15-22 UY 云图

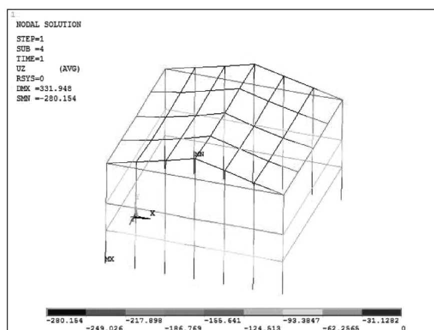


图 15-23 UZ 云图

```
/POST1
! 绘制转动位移云图
PLNSOL,ROT,X,0,1.0
PLNSOL,ROT,Y,0,1.0
PLNSOL,ROT,Z,0,1.0
PLNSOL,ROT,SUM,0,1.0
FINISH
```

图 15-24 所示为绕 X 轴的转动变形，图 15-25 所示为绕 Y 轴的转动变形。

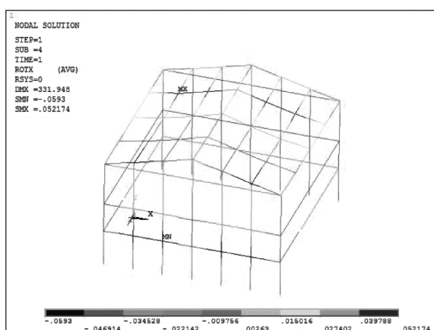


图 15-24 ROTX 云图

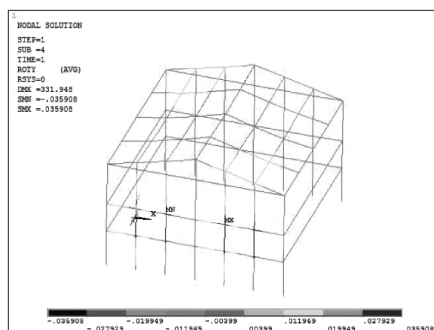


图 15-25 ROTY 云图

图 15-26 所示为绕 Z 轴的转动变形，图 15-27 所示为转动总变形。

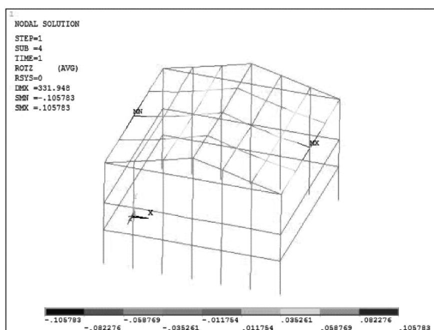


图 15-26 ROTZ 云图

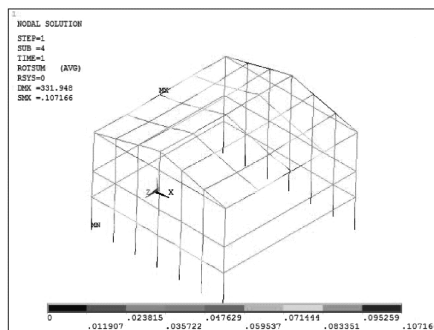


图 15-27 转动总变形图

绕 X 轴转动变形最严重处为屋顶；绕 Y 轴转动变形最严重处为迎风面；绕 Z 轴转动变形最严重处为屋顶中部。整体来看，边缘梁中点处是最危险的。

15.2 钢筋混凝土框架结构简单分析

框架结构是指由梁和柱以钢筋相连接构成承重体系的结构，即由梁和柱组成框架共同抵抗使用过程中出现的水平荷载和竖向荷载。

采用框架结构的房屋墙体不承重，仅起到围护和分隔作用，一般用预制的加气混凝土、膨胀珍珠岩、空心砖或多孔砖、浮石、蛭石、陶粒等轻质板材砌筑或装配而成，适合大规模工业化施工，效率较高，工程质量较好。

15.2.1 问题简述

混凝土 6 层框架，其主要结构类型为梁板柱结构。

楼板和屋盖厚度为 200 mm，框架主截面为 0.5 m×0.5 m，横梁截面为 0.3m×0.6 m。

其几何形状正立面如图 15-28 所示，侧立面如图 15-29 所示。

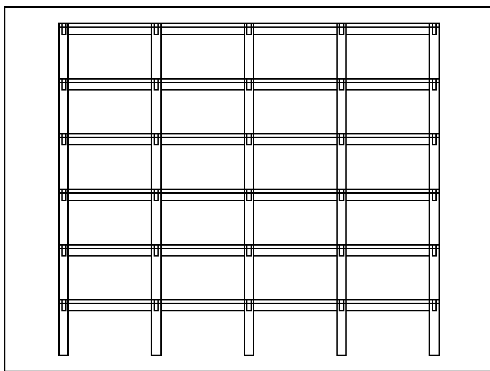


图 15-28 框架正立面图

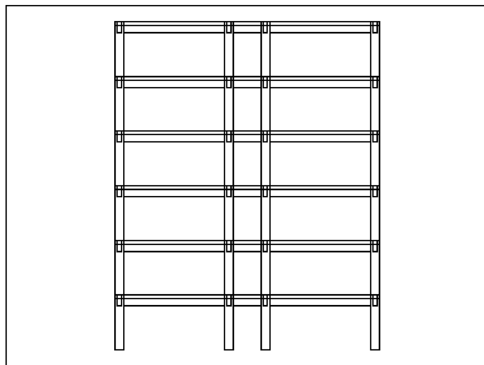


图 15-29 框架侧立面图

15.2.2 前处理

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Environment、Lisence、Working Directory，在 Job Name（项目名称）框中输入 FRAME。单击 Run 按钮进入 GUI 界面。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preferences 命令，在弹出的对话框中选中 Structural。

（2）定义单元类型。

混凝土采用 SOLID185 单元。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，利用弹出的对话框添加单元 SOLID185 为 1 号单元。

回到 Element Types 对话框中，选择 SOLID185，单击 Options 按钮，打开 SOLID185 ele-

ment type options 对话框，如图 15-30 所示。将 Element technology K2 设置为 Simple Enhanced Strn，单击 OK 按钮完成设置。

注意：SOLID185 单元没有实常数。

此处命令流如下。

```
/PREP7
ET,1,SOLID185
```

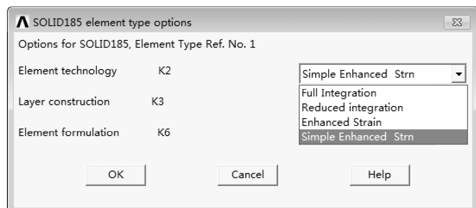


图 15-30 设置混凝土单元

(3) 定义材料属性。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的对话框中设置 EX 为 3e10，PRXY 为 0.1667。

在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Density，在弹出的对话框中输入密度值 2500，单击 OK 按钮，完成材料属性定义。

相应命令流如下。

```
MP,EX,1,3E10
MP,DENS,1,2500
MP,PRXY,1,0.1667
```

(4) 建立几何模型。

首先建立框架柱。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS，生成关键点。

关键点坐标如下。

```
点 1,(1.25,0,0.25);点 2,(1.25,0,-0.25);点 3,(0.75,0,0.25);
点 4,(0.75,0,-0.25);
点 5,(1.25,12,0.25);点 6,(1.25,12,-0.25);点 7,(0.75,12,0.25);
点 8,(0.75,12,-0.25);
```

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Arbitrary > Through KPs，依次拾取关键点 K1 ~ K8。单击 OK 按钮，建立第 1 根柱子的几何模型，如图 15-31 所示。

本例中各柱子尺寸相同，因此可以利用复制命令快速完成相应的几何模型操作。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Volumes，拾取已生成的柱子几何体，单击 OK 按钮，弹出 Copy Volumes 对话框。

设置 ITIME：2，DX = 6，单击 OK 按钮。此操作即以 X = 6 为增量，复制并保留原柱体，最终包括原型共 2 个柱体，如图 15-32 所示。

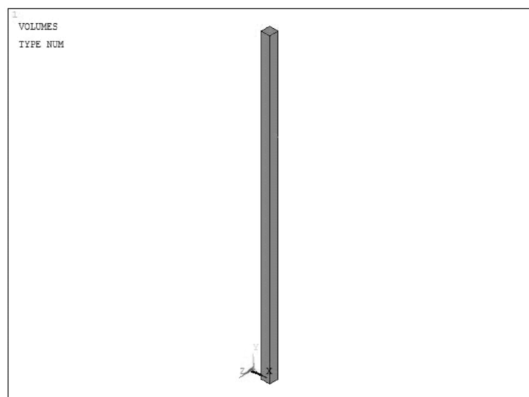


图 15-31 立柱模型

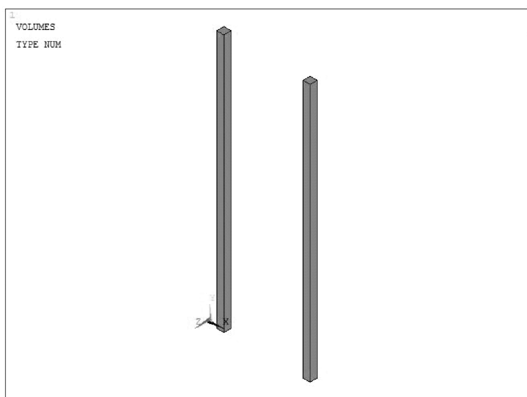


图 15-32 复制生成立柱

以同样的方法，将目前所有的 2 根柱子几何体同时复制，最终生成 5 排柱。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Volumes，拾取已生成的 2 根柱子几何体，单击 OK 按钮，弹出 Copy Volumes 对话框。设置 ITIME：5，DZ = 5，单击 OK 按钮。最终得到 5 排柱子，如图 15-33 所示。

此时只完成了一半柱子，可以通过复制命令完成剩下的一半柱子。

在此采取另一种生成方法：镜像生成体元素。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Volumes，拾取所有的柱体，单击 OK 按钮，弹出 Reflect Volumes 对话框。VSYMM 选择对称面为 YZ 平面，单击 OK 按钮完成镜像。最后生成所有柱体，如图 15-34 所示。

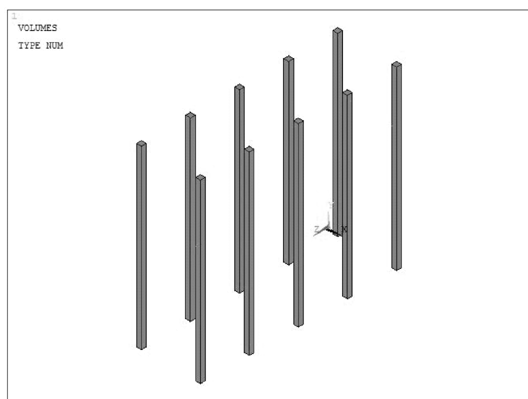


图 15-33 复制生成 5 排柱子

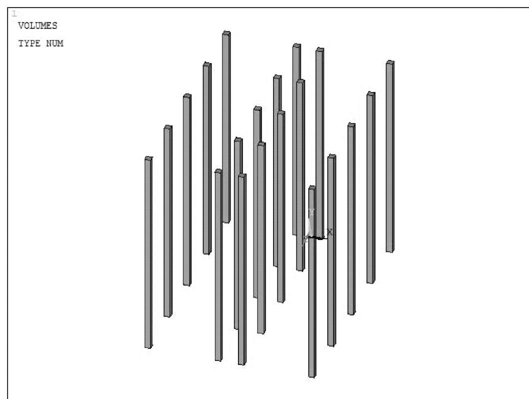


图 15-34 镜像生成另一半柱子

有关复制生成柱和镜像生成柱的命令流如下。

```
K,1,1.25,,0.25,                    ！生成 8 个关键点
K,2,1.25,,-0.25,
K,3,0.75,,0.25,
K,4,0.75,,-0.25,
K,5,1.25,18,0.25,
K,6,1.25,18,-0.25,
```

```
K,7,0.75,18,0.25,
K,8,0.75,18,-0.25,
V,1,2,4,3,5,6,8,7              ! 建立柱体
VGEN,2,all,,,6,,,,0            ! 复制
VGEN,5,all,,,,,5,,0
VSYMM,X,all,,,,0,0             ! 镜像
```

开始建立横梁。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS，生成横梁的 8 个关键点。关键点坐标如下。

```
点 161,(0.75,2.4,-0.11);点 162,(0.75,2.4,0.11);
点 163,(0.75,3,0.11);点 164,(0.75,4,-0.11);
点 165,(-0.75,2.4,-0.11);点 166,(-0.75,2.4,0.11);
点 167,(-0.75,3,0.11);点 168,(-0.75,3,-0.11);
```

同样，通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Arbitrary > Through KPs，依次拾取关键点 K161 ~ K168。单击 OK 按钮，建立第 1 层横梁的中跨几何模型。

通过复制体元素，生成另外 4 根横梁。路径同之前生成柱，设置 ITIME =5，DZ =5。

建立关键点：

```
点 201,(1.25,2.4,-0.11);点 202,(1.25,2.4,0.11);
点 203,(1.25,3,0.11);点 204,(1.25,3,-0.11);
点 205,(6.75,2.4,-0.11);点 206,(6.75,2.4,0.11);
点 207,(6.75,3,0.11);点 208,(6.75,3,-0.11);
```

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Arbitrary > Through KPs，依次拾取关键点 K161 ~ K168。单击 OK 按钮，生成第 1 层右跨梁。

仿照中跨梁生成的方式，生成其余右跨梁。

通过镜像命令，选择 V26 ~ V30，镜像生成第 1 层左跨梁。此时，第 1 层的横梁建立完毕，如图 15-35 所示。

利用复制命令，选择所有底层横梁，设置 ITIME = 6，DY = 3，生成所有横梁，如图 15-36 所示。

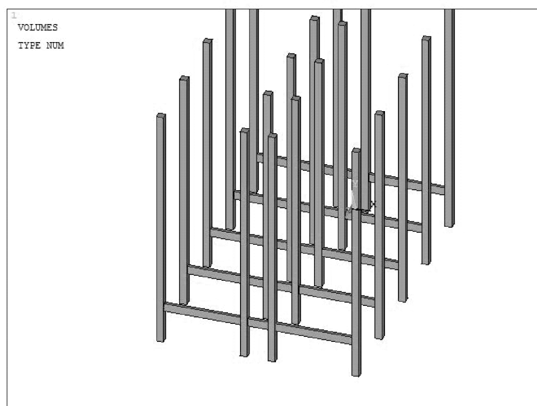


图 15-35 第 1 层横梁

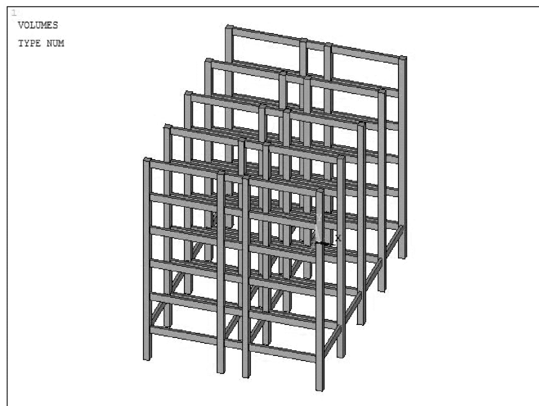


图 15-36 全部横梁

现在建立纵梁。第 1 根纵梁的关键点坐标如下。

```
点 521,(0.89,2.4,0.25);点 522,(1.11,2.4,0.25);
点 523,(1.11,3,0.25);点 524,(0.89,3,0.25);
点 525,(0.89,2.4,4.75);点 526,(1.11,2.4,4.75);
点 527,(1.11,3,4.75);点 528,(0.89,3,4.75);
```

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Arbitrary > Through KPs 连接各点生成第 1 根纵梁；通过复制和镜像生成全楼纵梁，方法同前，不做赘述。生成的梁柱框架如图 15-37 所示。

生成楼板。定义板的关键点如下。

```
点 905,( -7.25,2.8, -0.25);点 906,( -7.25,2.8,20.25);点 907,(7.25,2.8,20.25);
点 908,(7.25,2.8, -0.25);点 909,( -7.25,3, -0.25);点 910,( -7.25,3,20.25);
点 911,(7.25,3,20.25);点 912,(7.25,3, -0.25);
```

同样连点成体，生成第 1 层楼板，如图 15-38 所示。通过复制，设置 ITIME =6，DY = 3，生成 6 层楼板。

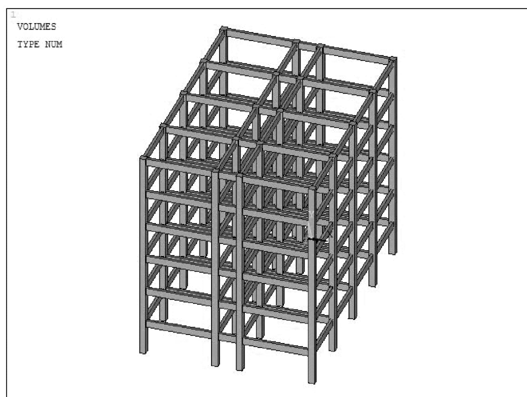


图 15-37　梁柱框架几何模型

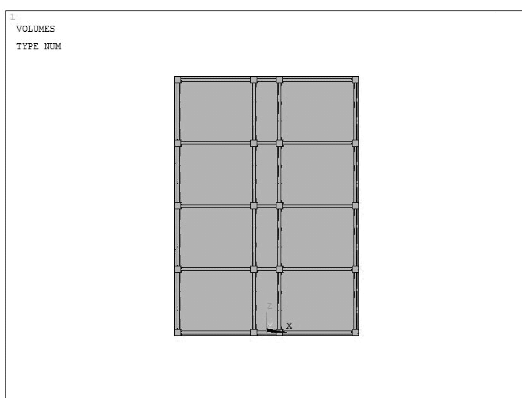


图 15-38　首层楼板

搭接几何体。此时生成的梁板柱为分离的几何体。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Overlap > Volumes，选择所有几何体，单击 OK 按钮，使各几何元素搭接成整体。

搭接命令为：

```
! 生成体
VGEN,4,66,,,,,5,,0
VGEN,2,66,69,,6,,,,0
VSYMM,X,66,73,,,0,0
VGEN,3,66,81,,,4,,,0
V,905,906,907,908,909,910,911,912
VGEN,3,114,,,,4,,,0
! 将所有体进行搭接
VOVLAP,ALL
```

最后得到 3 层框架楼的几何模型，如图 15-39 所示。

（5）划分网格。

几何模型生成后，还要通过划分网格将其转换为有限元模型。在此之前先进行单元属性的赋予与网格尺寸控制。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs，设定单元属性。单元类型选择 1，MAT 选择 1，单击 OK 按钮完成定义。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > All Lines，为当前所有直线设定单元划分尺寸的大小，在弹出对话框中设定 SIZE = 1。

完成设置后，通过路径 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volumes > Free 完成网格的划分。

相应的命令流如下。

```
！划分网格
LESIZE,ALL,1,,,,1,,,1,              ！控制单元大小
TYPE,1                              ！选择单元类型
MAT,1                               ！选择材料属性
ESYS,0                              ！单元坐标系
MSHAPE,1,3D                         ！定义实体单元形状
MSHKEY,0                            ！划分方式
VMESH,ALL                           ！体划分
```

划分后的有限元模型如图 15-40 所示。

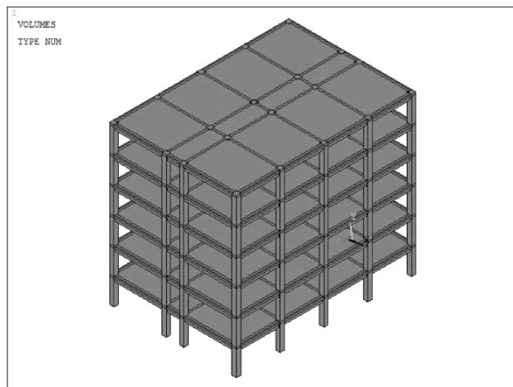


图 15-39　完整的几何模型

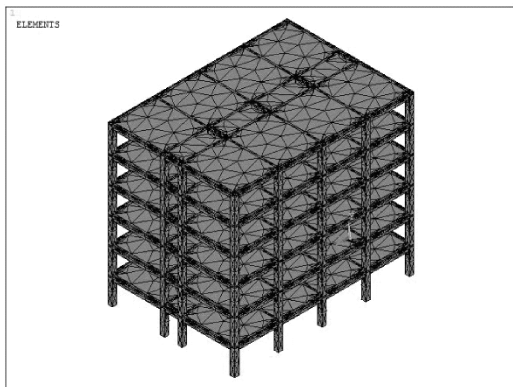


图 15-40　有限元模型

15.2.3 求解

（1）定义分析类型。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，在弹出的对话框中选中 Static 单选按钮。

（2）施加约束。

选择各立柱与地面接触的面，即 Y = 0 的面，施加约束。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令打开 Select Entities 对话框，如图 15-41 所示。在第 1 个下拉列表框中选择 Areas，在第 2 个下拉列表框中选择 By Location，

然后选中 Y coordinates 单选按钮，在输入框中输入 0，单击 OK 按钮，完成对象的拾取。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮。在弹出的对话框中选择 ALL DOF，单击 OK 按钮，对所有底面施加全部自由度的约束，如图 15-42 所示。

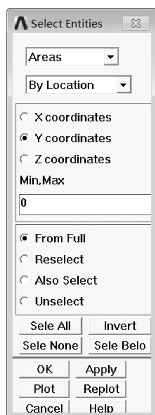


图 15-41 选取实体

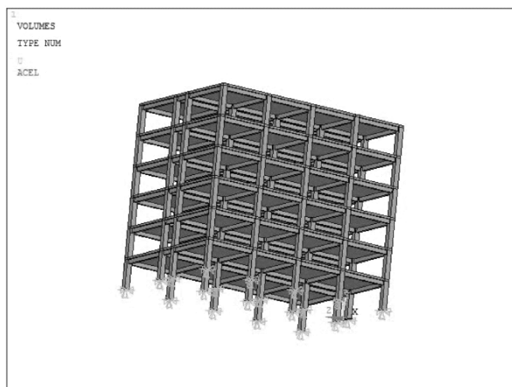


图 15-42 施加地面约束（底面仰视图）

（3）施加重力。

首先通过路径 Utility Menu > Select > Everything，选取所有实体。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Gravity > Global 命令，在弹出的对话框中设置 ACEL Y 为 10，单击 OK 按钮，对整体施加重力荷载。

（4）通过路径 Main Menu > Solution > Solve > Current LS，开始求解。

本阶段命令流如下。

```
/SOLU                    ! 进入求解器
ANTYPE,0                 ! 选择分析类型
ASEL,S,LOC,Y,0
DA,all,ALL,              ! 约束所有自由度
ALLSEL,ALL               ! 选择所有实体
ACEL,0,10,0,             ! 施加重力荷载
SOLVE                    ! 求解
FINISH                   ! 结束求解器
```

15.2.4 后处理

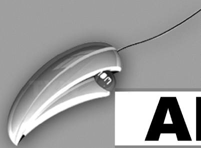
求解完成，查看计算结果。

（1）显示结构变形。

进入通用后处理器。通过路径 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape 可以查看结构变形。

相应的命令流如下。

```
/POST1                   ! 进入通用后处理器
PLDISP,2                 ! 绘制变形图
```



结构正立面变形图如图 15-43 所示，侧立面变形图如图 15-44 所示。



图 15-43 结构正立面变形图



图 15-44 结构侧立面变形图

由图可见，变形主要发生在梁的跨中。最大变形 0.895E－3，变形很小。

变形主要是由梁的弯曲挠度和柱子的轴向压缩引起的，以梁变形为主，柱子的轴向变形相对较小。在跨度较小时，梁的挠度也很小。

（2）位移云图。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，在弹出的对话框中选择 DOF Solution 可以查看位移云图。

相应的命令流如下。

```
PLNSOL,U,Y,0,1                    ! 绘制 Y 向位移云图
PLNSOL,U,SUM,0,1                  ! 绘制总位移云图
```

得到结构 Y 向位移云图如图 15-45 所示，结构位移总云图如图 15-46 所示。

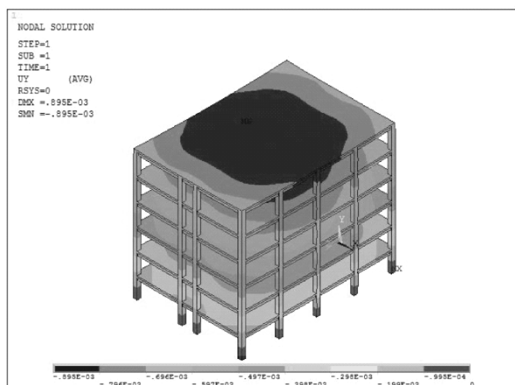


图 15-45 结构 Y 向位移云图

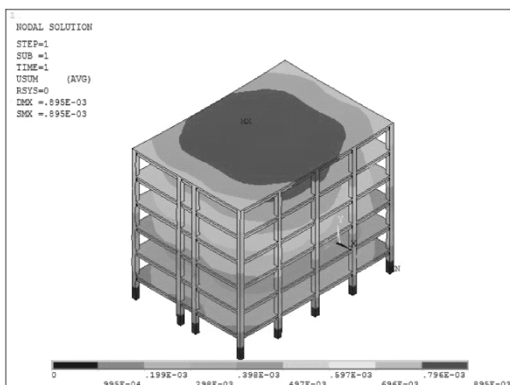


图 15-46 结构位移总云图

（3）显示主应力云图。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，在弹出的对话框中选择 Stress，可以查看 Y 方向应力的云图，如图 15-47 所示。

在 GUI 界面中选择 Utility > Plot Ctrls > Device Options 命令，在弹出的对话框中选中 Vec-

tor Mode 右侧的 On 复选框，可以查看应力矢量，如图 15-48 所示。

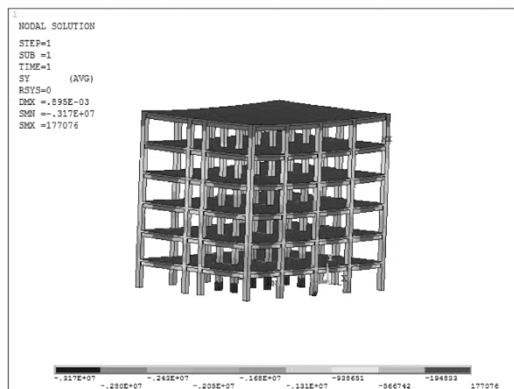


图 15-47　Y 向应力云图

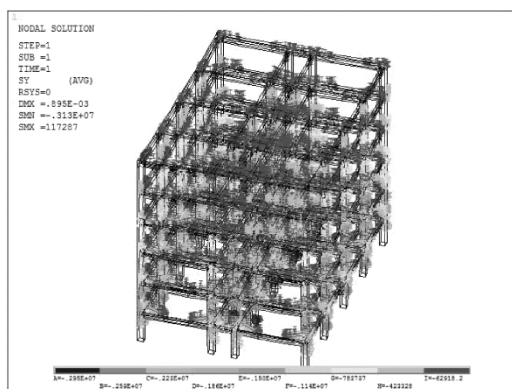


图 15-48　Y 向应力强度矢量图

本阶段命令流如下。

```
! 进入通用后处理器
/POST1
PLDISP,2                       ! 绘制变形图

PLNSOL,U,Y,0,1                 ! 绘制 Y 方向位移云图
PLNSOL,U,SUM,0,1               ! 绘制总位移云图
! 打开矢量开关
/DEVICE,VECTOR,1
PLNSOL,U,Y,0,1                 ! Y 方向变形等值线
PLNSOL,S,Y,0,1                 ! Y 方向应力等值线
```

15.3　本章小结

本章首先对钢结构的典型形式——排架结构进行了建模及静力学分析，从中可以掌握钢结构的常用单元类型，以及排架结构的建模方法；然后对钢筋混凝土框架结构进行了建模及分析，通过实例分析，相信读者对建模中的复制以及镜像等快捷建模方式有了深刻的理解。

钢结构及钢筋混凝土结构是土木工程中最常遇到的结构，掌握好这一部分对于 ANSYS 的实际应用很重要。

第 16 章　膜结构及网壳结构分析

结构体系是指结构抵抗外部作用的构件组成方式。本章将对空间结构体系中常用的膜结构及空间网壳结构体系进行建模及分析，以帮助用户熟悉不同结构体系的建模方法。

本章学习目标

- 掌握膜结构的建模方法及找形分析方法
- 掌握空间网壳结构的循环命令建模方法

16.1　膜结构

膜结构是 20 世纪中叶发展起来的一种新型大跨度空间结构形式。它通过施加预应力，使结构具有一定的刚度以承受各种荷载作用，其设计思路和设计步骤与传统结构相比都有很大的不同。

索膜结构是用高强度柔性薄膜材料经受其他材料的拉压作用而形成稳定的曲面，能承受一定外荷载的空间结构形式。凭借其造型自由、轻巧、柔美，充满力量感，以及阻燃、制作简易、安装快捷、节能、易于使用、安全等优点，索膜结构在世界各地得到了广泛的应用。

16.1.1 相关知识简介

常见的膜结构按结构可分为：

- 骨架式膜结构。
- 张拉式膜结构。
- 充气式膜结构。

膜结构按支承条件分类为：

- 柔性支承结构体系。
- 刚性支承结构体系。
- 混合支承结构体系。

膜结构分析的主要过程包括找形分析、荷载分析和裁剪分析。而在索膜结构设计中，找形分析是至关重要的一个步骤，其目的是确定结构的初始几何形状及应力分布状态。

使用 ANSYS 进行膜结构找形分析，首先应建立平面模型，设定很小的弹性模量，利用几何边界条件和给定的应力条件生成平衡曲面，称为第一次找形。

然后将支座固定，进行模型修正，直到膜面应力趋于相等或满足一定的误差，得到近似的最小曲面，此为第二次找形。

16.1.2 问题简述

某一悬链面，顶圆半径 a = 2.5 m，底圆半径 b = 27.5 m，高 h = 7.7224 m，膜材料弹性模量为 6000 kN/m^2，泊松比 0.38，膜厚 1 mm。膜顶预应力 18 kN/m。其结构示意图如图 16-1 所示。

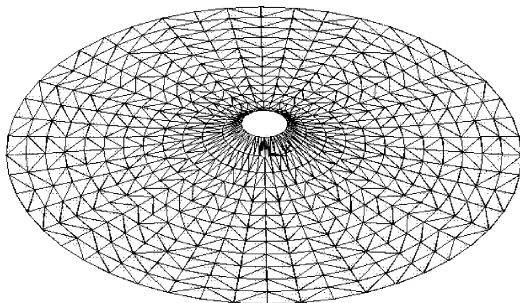


图 16-1　膜结构示意图

16.1.3 前处理

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Environment、Lisence、Working，Directory，在 Job Name（项目名称）框中输入 Membrane。单击 Run 按钮进入 GUI 界面。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preferences 命令，在弹出的对话框中选中 Structural。

（2）定义单元类型。本例中膜结构选用 SHELL181 单元。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，利用弹出的 Library of Element Types 对话框添加单元 SHELL181 为 1 号单元。

（3）定义材料属性。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的对话框中设置 EX 为 6e3、PRXY 为 0.38。

在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Thermal Expansion Coef > Isotropic，在弹出的对话框中设置线膨胀系数为 10。

在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Density，在弹出的对话框中输入密度值 7800，单击 OK 按钮，完成材料属性定义。

（4）定义单元截面特性。

定义膜的厚度。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Shell > Lay - up > Add / Edit 命令，弹出 Create and Modify Shell Sections 对话框。在其中设置 Thickness 为 1e - 3，材料 ID 为 1，单击 OK 按钮完成设置。

（5）建立模型。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Circle > Partial

Annulus，在弹出的如图 16-2 所示 Part Annular Circ Avea 对话框中设置 Rad－1＝2.5，Rad－2＝27.5，Theta－2＝90。单击 OK 按钮，生成 1/4 圆，如图 16-3 所示。

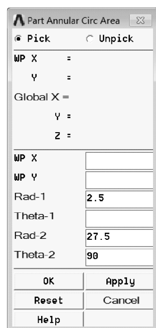


图 16-2　绘制扇形面

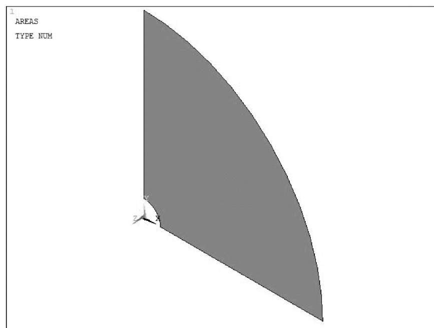


图 16-3　1/4 几何模型

（6）划分单元。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Areas，为当前的面赋予属性。其中 MAT 选择 1，TYPE 选择 1。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，在弹出的对话框中将拾取对象设置为 Lines，拾取方式设置为 By Length/Rad，选择 Length，输入长度值 25，单击 OK 按钮，完成当前所有径向直线的拾取。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > All Lines，为当前选取的所有直线划分单元尺寸。其中 NDIV 设置为 12，表示每条线划分为 12 份。

再次选择 Utility Menu > Select > Entities 在弹出的对话框中单击 Invert 按钮，单击 OK 按钮。完成反选后，将其划分为 16 份。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesher Opts 命令，在弹出的对话框中设置 MSHKEY 为 Mapped。

设置完毕，通过路径 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 Sided 完成网格划分，如图 16-4 所示。

（7）对称生成全模型。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Areas 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，拾取全部面。在弹出的对话框中，设置对称轴为 X，单击 OK 按钮，生成 1/2 模型。以同样的方法，将对称轴设置为 Y，完成全模型的生成，如图 16-5 所示。

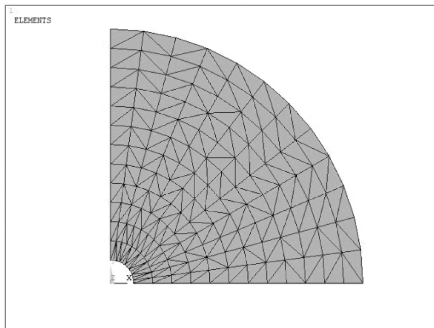


图 16-4　1/4 模型

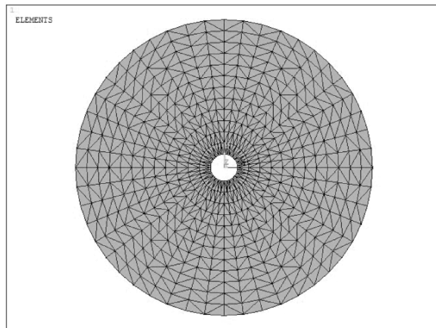


图 16-5　全模型

此时交界部位出现重叠直线及关键点元素。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Merge Items 命令，在弹出的对话框中将 Label 设置为 ALL，单击 OK 按钮，合并所有重叠元素。

16.1.4 施加约束及荷载

（1）施加约束。

约束底圆周边。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，在弹出的对话框中设置拾取对象为 Lines，拾取方式为 By Length/Rad，选择 Radius，设置其值为 27.5，单击 OK 按钮，当前所选对象即为底圆圆周。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，拾取底圆圆周。利用弹出的对话框添加约束 UX,UY,UZ。

约束顶圆周边并施加位移。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，在弹出的对话框中设置拾取对象为 Lines，拾取方式为 By Length/Rad，选择 Radius，设置值为 2.5，单击 OK 按钮，当前所选对象即为顶圆圆周。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，拾取顶圆圆周。利用弹出的对话框添加约束 UX,UY。单击 Apply 按钮，再选择 UZ，在 VALUE Displacement Value 框中输入 7.7224。

（2）施加温度荷载，模拟预应力。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Temperature > On Areas，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，添加温度 -0.186。

16.1.5 找形分析

（1）第 1 次找形分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，在弹出的对话框中选中 Static 单选按钮，将分析类型设置为静力分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls 命令，弹出图 16-6 所示 Solution Controls 对话框。在 Basic 选项卡中，在 Analysis Options 下拉列表框中选择 Large Displacement Static，在 Number of substeps 框中输入 25，在 Write Items to Results File 选项组中选中 All solution items 单选按钮，在 Frequency 下拉列表框中选择 Write last substep only，单击 OK 按钮。

设置完毕，通过路径 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 开始求解。

求解完毕，在通用后处理器中读入求解后的数据，路径 Main Menu > General Postproc > Read Results > Last Set。此时可得到位移拉伸后的膜结构图，如图 16-7 所示。

此时由于网格和节点发生位移，需要修正坐标位置。

路径：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Other > Updt Node Coord。

第一次找形完成后如图 16-8 所示。第 1 主应力分布为 9655.83 ~ 11651.4，范围较大。

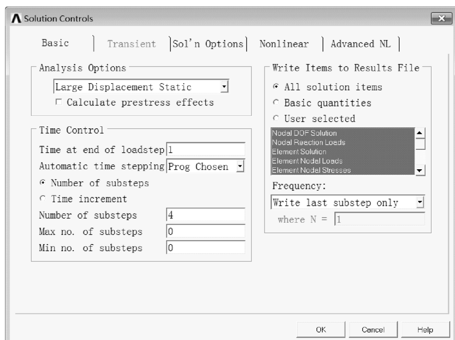


图 16-6　设置求解控制选项

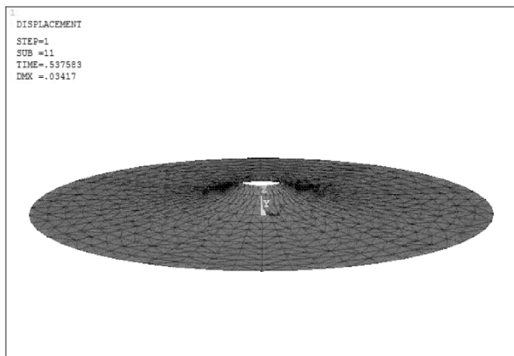


图 16-7　拉伸后的膜

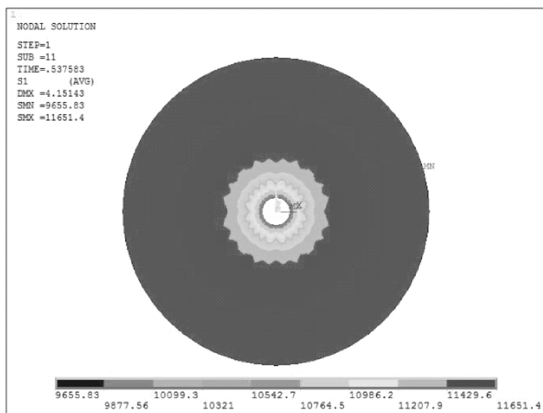


图 16-8　第 1 次找形后

（2）第 2 次找形分析。

修改约束条件，将提升到位的顶圆边界固定，进行第 2 次找形分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis，在弹出的对话框中选中 Static 单选按钮，将分析类型设置为静力分析。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，在弹出的对话框中设置拾取对象为 Lines，拾取方式为 By Length/Rad ，选择 Radius，设置其值为 2.5，单击 OK 按钮，当前所选对象即为顶圆圆周。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，拾取顶圆圆周。利用弹出的对话框添加约束 UX,UY,UZ，单击 OK 按钮。

设置完毕，通过路径 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 开始求解。

求解完成后再一次修正坐标位置：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Other > Updt Node Coord。此时得到的应力分布为 9509.62 ~ 9704.74，分布得相当均匀，如图 16-9 所示。变形如图 16-10 所示，为 0.95378 m。

使用 APDL 编写循环语句，完成多次计算，以进一步修正模型。命令流如下。

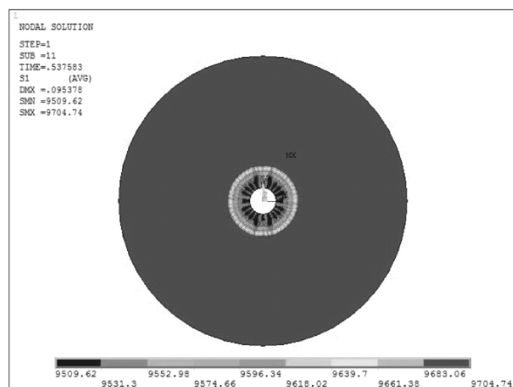


图 16-9 第 1 主应力

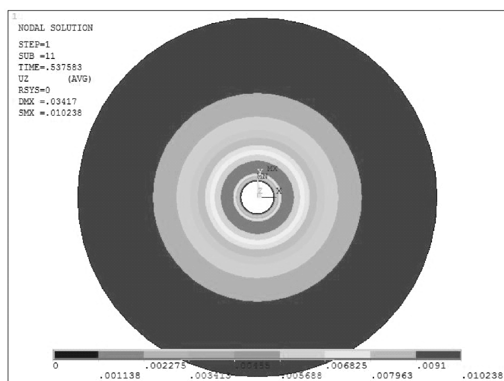


图 16-10 变形云图

```
*DO,I,1,20                      !循环开始语句,循环 20 次
/SOLU                           !进入求解模块
SOLVE                           !开始求解
FINISH                          !退出求解模块
/POST1                          !进入通用后处理器
SET,LAST                        !读入最后一步运算结果
PLDISP,                         !绘制变形图
FINISH
/PREP7                          !进入前处理模块
UPCOORD,1                       !更新坐标
FINISH
*ENDDO                          !结束循环
FINISH
```

最终结果，第 1 主应力云图如图 16-11 所示，变形云图如图 16-12 所示。

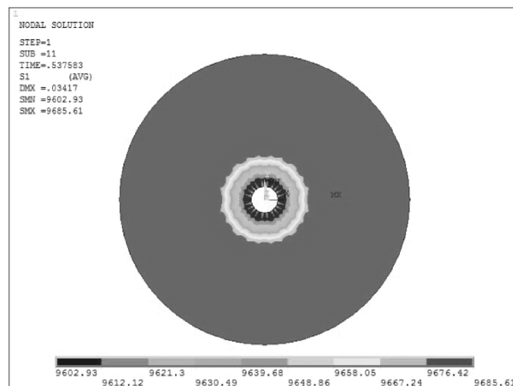


图 16-11 第 1 主应力云图

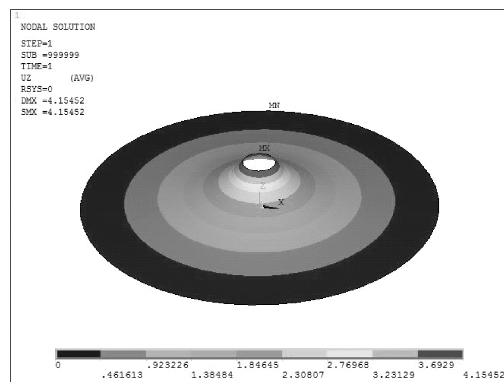


图 16-12 变形云图

经过多次迭代之后，结果更为精确，最终得到应力分布为 9602.93～9685.61，变形误差为 0.034312。

16.1.6 膜结构的前景

近年来，随着建筑空间观念日益深入人心以及科技手段的不断提高，“回归自然”“沐

浴自然之温馨”已成为现代建筑环境学发展的主流。

室内外的界限越来越模糊，出现了许多亦内亦外、相互渗透的不定空间，如大厅装饰、天井、四季厅、动植物园、公园广场、观景台、舞台、体育场馆、体育看台、文化娱乐场所等。

由于膜材的光透性，白天阳光可以透过膜材形成漫射光，使膜覆盖空间内部达到和室外几乎一样的自然效果，因此膜结构常被用来创造与自然环境相媲美的空间形式。

16.2 空间网壳结构

网壳结构的常见形式有圆柱面网壳、圆球网壳和双曲抛物面网壳。网壳结构分析属于非线性屈典问题。下面介绍一个圆柱壳结构分析实例。

16.2.1 问题描述

一个对边简支的圆柱壳如图 16-13 所示，在其中心作用一个垂直的集中荷载。本例将分析当荷载大小为 1000 N 时，A、B 两点的垂直位移（UY）。

模型的几何与材料参数如表 16-1 所示。

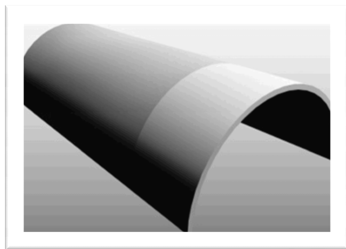


图 16-13 模型示意图

表 16-1 几何与材料参数

材料特性	
弹性模量	EX = 3.10275 kN/mm^2
泊松比	NUXY = 0.3
几何特性	
R = 2540 mm	L = 254 mm
H = 6.35 mm	θ = 0.1 rad
荷载	p = 1000 N

16.2.2 求解分析过程

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，弹出 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。在该窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 框中输入工作目录，在 Job Name 框中输入项目名称 16-2。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。

（2）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters 命令，弹出 Scalar Parameters 对话框，定义如下参数。

```
R1 = 2540
L = 254
PI = 4 * ATAN(1)
THETA = 0.1 * 180/PI
```

完成定义的参数如图 16-14 所示。

（3）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，弹出图 16-15 所示的 Library of Element Types 对话框。

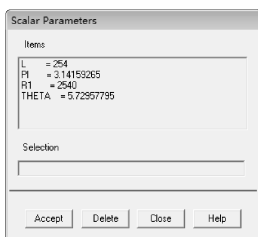


图 16-14　Scalar Parameters 对话框

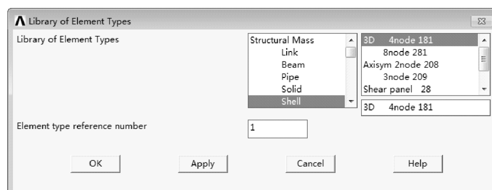


图 16-15　Library of Element Types 对话框

选择 Shell > 3D 4node 181（即 SHELL181）单元，单击 OK 按钮，完成单元类型定义。

（4）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出图 16-16 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。

选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic 材料模型，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Model Number 1 对话框，设置材料参数如图 16-17 所示。

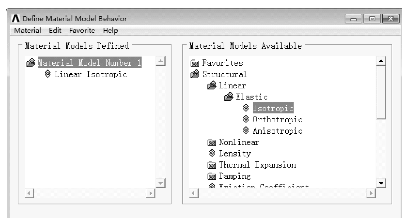


图 16-16　Define Material Model Behavior 对话框

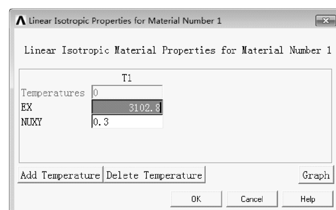


图 16-17　材料参数

（5）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Shell > Lay - up > Add / Edit 命令，弹出 Create and Modify Shell Sections 对话框。

设置截面参数如图 16-18 所示，单击 OK 按钮，完成截面定义。

（6）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cylindrical 命令，将全局坐标系转换到柱坐标系。

（7）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS 命令，弹出 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，输入节点坐标，如图 16-19 所示。

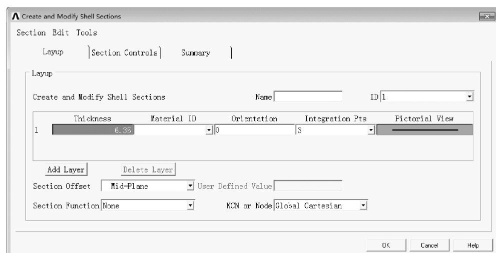


图 16-18　Create and Modify Shell Sections 对话框

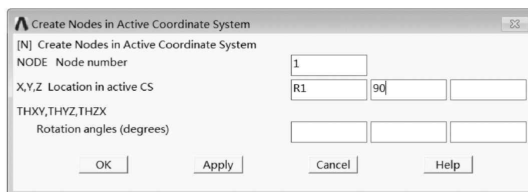
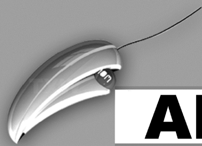


图 16-19　Create Nodes in Active Coordinate System 对话框



单击 Apply 按钮，完成 1 号节点定义。继续输入节点 2 的坐标，X、Y 坐标与节点 1 相同，Z = L，然后单击 OK 按钮，完成节点 2 的定义。

（8）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。

输入第 1 个关键点坐标，如图 16-20 所示。单击 Apply 按钮，继续输入表 16-2 所示的剩余全部关键点坐标。

表 16-2　关键点坐标

关　键　点	X	Y	Z
1	R1	90	
2	R1	(90 - THETA)	
3	R1	90	L
4	R1	(90 - THETA)	L

（9）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Global > Size 命令，弹出图 16-21 所示的 Global Element Sizes 对话框。

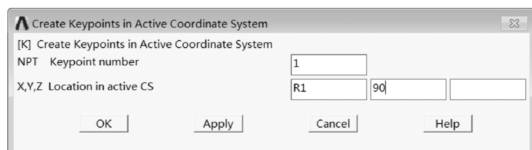


图 16-20　Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

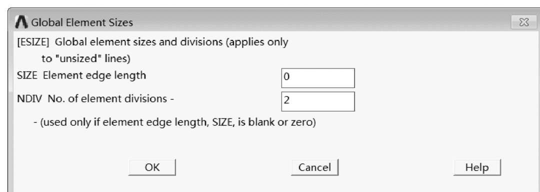


图 16-21　Global Element Sizes 对话框

设置划分的份数为 2，单击 OK 按钮。

（10）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Plot Ctrls > Numbering 命令，弹出图 16-22 所示的 Plot Numbering Controls 对话框。

选中 KP Keypoint numbers 右侧的 On 复选框，单击 OK 按钮，在工作区中显示关键点编号，如图 16-23 所示。

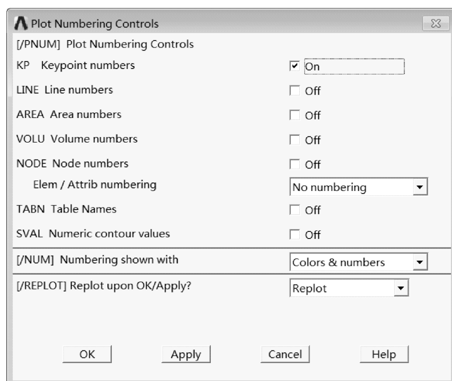


图 16-22　Plot Numbering Controls 对话框

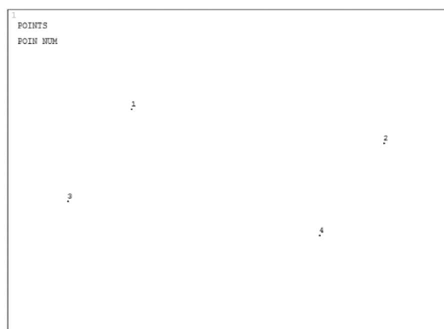


图 16-23　显示关键点编号

（11）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs 命令，弹出图 16-24 所示的 Create Area thru KPs 对话框，输入关键点号“1，3,4,2”，单击 OK 按钮。生成的面如图 16-25 所示。



图 16-24 Create Area thru KPs 对话框

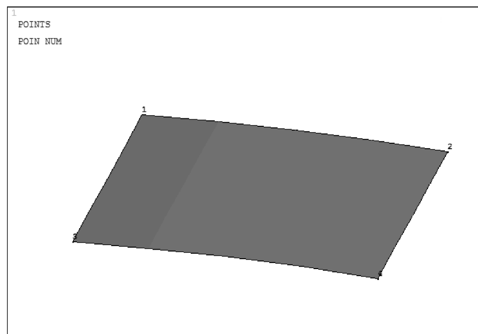


图 16-25 生成弧面

（12）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 Sided 命令，拾取刚生成的面，单击 OK 按钮，划分完成的面如图 16-26 所示。

（13）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Merge Items 命令，弹出图 16-27 所示的 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框。

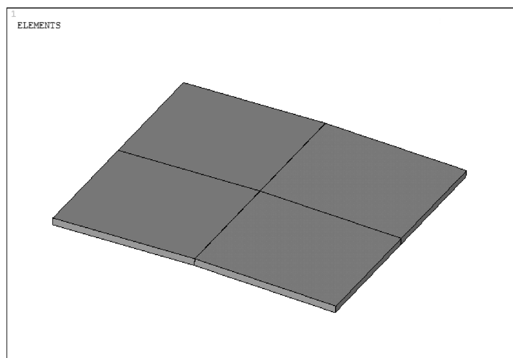


图 16-26 完成网格划分

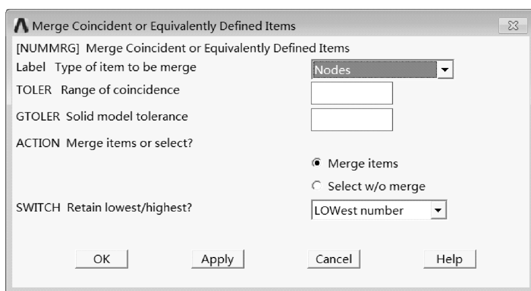


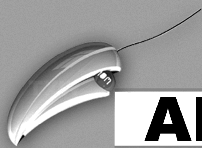
图 16-27 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框

设置合并对象为 Nodes（节点），单击 OK 按钮，完成节点合并。

（14）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框，设置如图 16-28 所示，单击 OK 按钮，选出 Z = 0 的节点，如图 16-29 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > Symmetry B. C. > On Nodes 命令，弹出图 16-30 所示的 Apply SYMM on Nodes 对话框。

设置对称方向为 Z 轴，即以 XY 平面为对称面，单击 OK 按钮，效果如图 16-31 所示。参考上述操作，选出 Y = 90 的节点，设置以 YZ 平面为对称面的约束，完成的约束如图 16-32 所示。



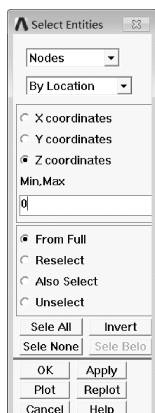


图 16-28　Select Entities 对话框

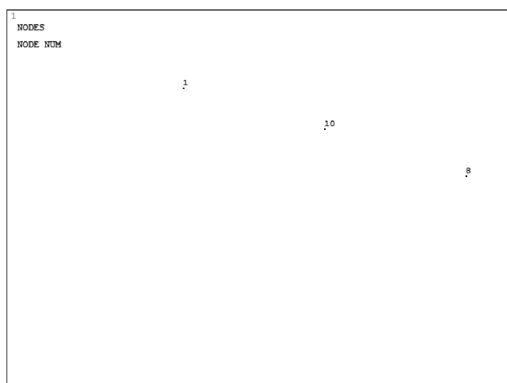


图 16-29　选出的节点

（15）在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，弹出图 Select Entities 对话框，设置如图 16-33 所示，单击 OK 按钮，选出 Z = 0 的节点，如图 16-34 所示。

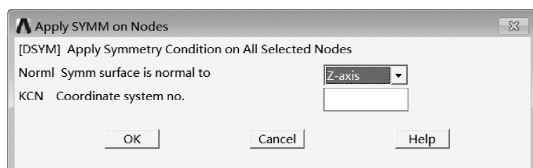


图 16-30　Apply SYMM on Nodes 对话框

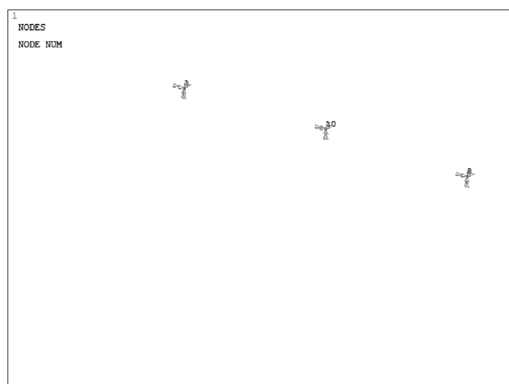


图 16-31　对称约束

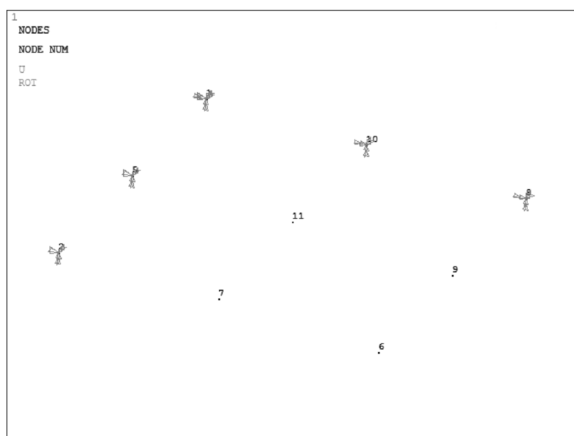


图 16-32　完成对称约束定义



图 16-33 Select Entities 对话框



图 16-34 选出的节点

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，弹出图 16-35 所示的 Apply U,ROT on Nodes 对话框。

选择要约束的自由度为 UX，单击 OK 按钮，完成约束后如图 16-36 所示。此时，模型的边界条件如图 16-37 所示。

（16）在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，弹出图 16-38 所示的 New Analysis 对话框，设置分析类型为 Static，单击 OK 按钮。

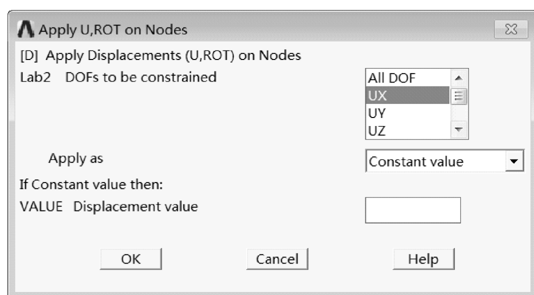


图 16-35 Apply U,ROT on Nodes 对话框

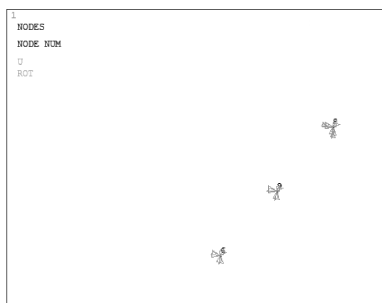


图 16-36 完成约束

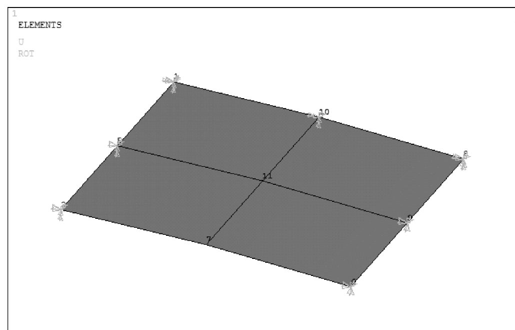


图 16-37 完整边界条件

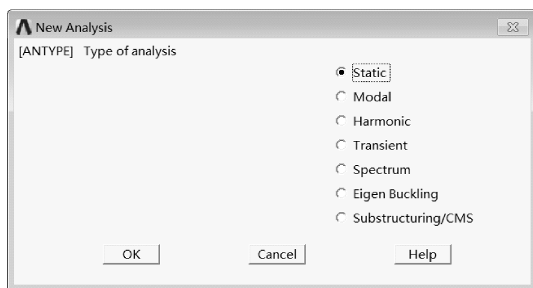


图 16-38 New Analysis 对话框

(17) 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes 命令，在弹出的对话框中输入节点号 1。单击 OK 按钮，弹出如图 16-39 所示的 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab Direction of force/mom 下拉列表框中选择 FY，在 VALUE Force/Moment Value 框中输入 -220，单击 OK 按钮。加载完成后如图 16-40 所示。

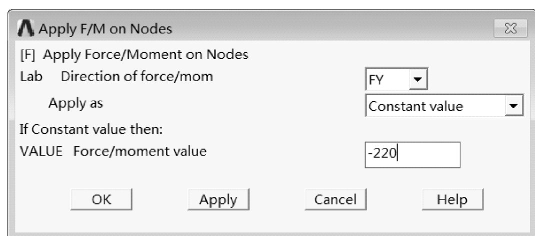


图 16-39 Apply F/M on Nodes 对话框

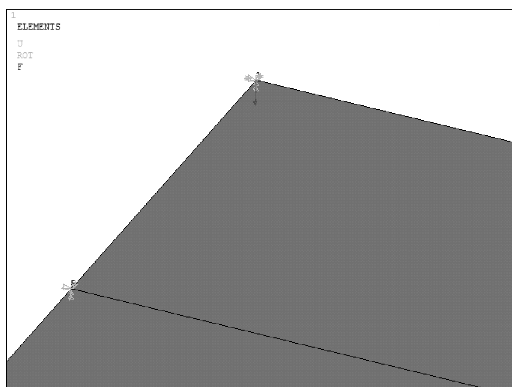


图 16-40 加载

(18) 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls 命令，弹出 Solution Controls 对话框，在 Basic 选项卡中设置如图 16-41 所示。

选择 Advanced NL 选项卡，设置如图 16-42 所示，然后单击 OK 按钮。

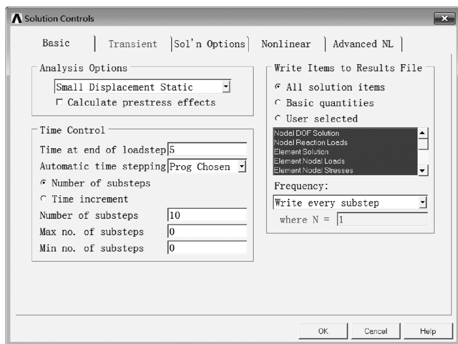


图 16-41 Solution Controls 对话框（Basic 选项卡）

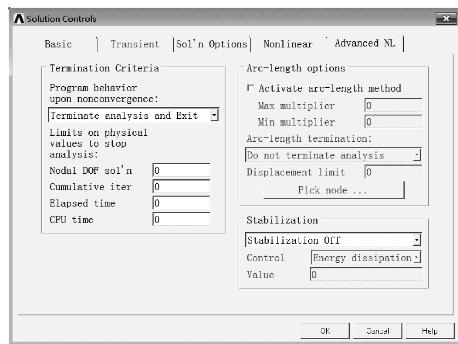


图 16-42 Advanced NL 选项卡

(19) 在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 命令，弹出图 16-43 所示的/STATUS Command 窗口，其中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有如图 16-44 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done！提示时，表明求解完成。

求解过程中的收敛曲线如图 16-45 所示。

可以通过如图 16-45 所示收敛曲线查看计算过程的收敛情况，对于结果的判断分析、出现不收敛时的处理有一定的参考意义。

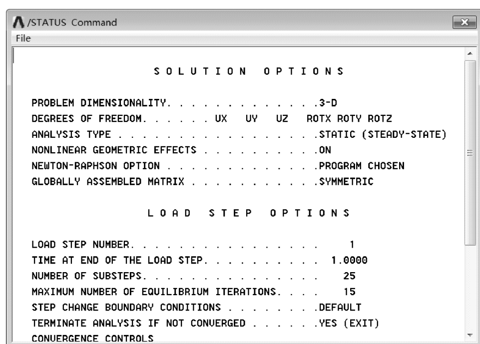


图 16-43 /STATUS Command 窗口

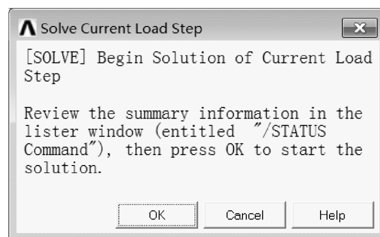


图 16-44 Solve Current Load Step 对话框

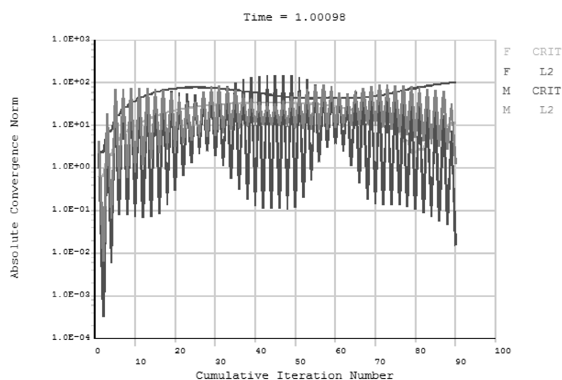


图 16-45 收敛曲线

本例可以使用命令操作，提供 APDL 命令流如下。

```
FINI                              ! 清空工作区
/CLE                              !
                                  !
/PREP7                            ! 进入前处理器
SMRT,OFF                          ! 关闭智能网格划分
ET,1,SHELL181,,1                  ! 定义单元类型
R,1,6.350                         !
MP,EX,1,3102.75                   ! 材料属性
MP,NUXY,1,0.3                     !
R1 =2540                          ! 参数
L =254                            !
PI =4 * ATAN(1)                   !
THETA =0.1 * 180/PI               !
CSYS,1                            ! 切换至柱坐标系
                                  !
N,1,R1,90                         ! 建模,生成节点
N,2,R1,90,L                       !
K,1,R1,90                         ! 关键点
K,2,R1,(90 - THETA)               !
K,3,R1,90,L                       !
K,4,R1,(90 - THETA),L             !
                                  !
ESIZE,,2                          ! 定义单元尺寸
```

```
A,1,3,4,2                                   ! 关键点围成面
AMESH,1                                     ! 划分单元
NUMMRG,NODE                                 ! 合并节点
                                            !
NSEL,S,LOC,Z,0                              !
DSYM,SYMM,Z                                 ! 定义对称约束
NSEL,S,LOC,Y,90                             !
DSYM,SYMM,X                                 !
NSEL,S,LOC,Y,(90 - THETA)                   !
D,ALL,UX,,,,,UY,UZ                          ! 定义约束
NSEL,ALL                                    !
FINISH                                      !
                                            !
/SOLUTION                                   ! 进入求解器
ANTYPE,STATIC                               ! 定义分析类型,静态分析
NLGEOM,ON                                   ! 打开大变形开关
OUTRES,,1                                   ! 输出结果
F,1,FY, -250                                ! 加载
NSUBST,30                                   ! 定义子步数
ARCLEN,ON,4                                 ! 使用弧长法求解
SOLVE                                       ! 求解
FINISH                                      !
                                            !
/POST26                                     ! 进入时间历程后处理器查看荷载位移曲线
NSOL,2,1,U,Y                                !
NSOL,3,2,U,Y                                !
PROD,4,1,,,LOAD,,,4 * 250                   !
PROD,5,2,,,,,, -1                           !
PROD,6,3,,,,,, -1                           !
*GET,UY1,VARI,2,EXTREM,VMIN                 !
*GET,UY2,VARI,3,EXTREM,VMIN                 !
PRVAR,2,3,4                                 !
/AXLAB,X,DEFLECTION(MM)                     !
/AXLAB,Y,TOTALLOAD(N)                       !
/GRID,1                                     !
/XRANGE,0,35                                !
/YRANGE, -500,1050                          !
XVAR,5                                      !
PLVAR,4                                     !
XVAL,6                                      !
PLVAR,4                                     !
FINISH                                      ! 完成
```

（20）进入/POST26 时间历程后处理器，单击 Time History Variables 对话框中的添加变量按钮，弹出图 16-46 所示的 Add Time - History Variable 对话框。

弹出拾取框后，输入节点号 1，单击 OK 按钮，完成第一个变量的添加。

重复上述操作，将 2 号节点的 Y 方向位移值也添加到变量列表中。

（21）在 Time History Variables 对话框中的 Caculator 输入框中，输入 LOAD = nsol(2,U,Y) * 1000，如图 16-47 所示。

按〈Enter〉键，生成变量 LOAD。重复上述操作，将变量 2 乘以 -1，得到变量 5；将变量 3 乘以 -1，得到变量 6；将 X 轴设置为变量 5。添加完变量后如图 16-48 所示。

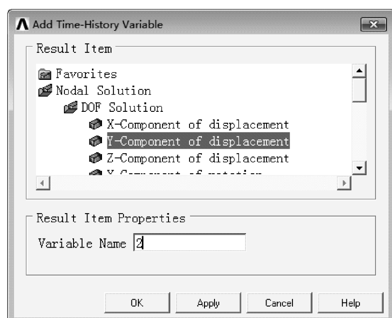


图 16-46　Add Time - History Variable 对话框

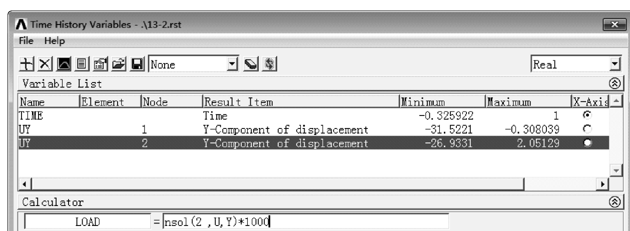


图 16-47　进行变量运算

此时，以变量 5 为 X 轴，LOAD 为 Y 轴，绘出节点 1 的荷载 - 位移曲线，如图 16-49 所示。

以变量 6 为 X 轴，绘出节点 2 的荷载 - 位移曲线，如图 16-50 所示。

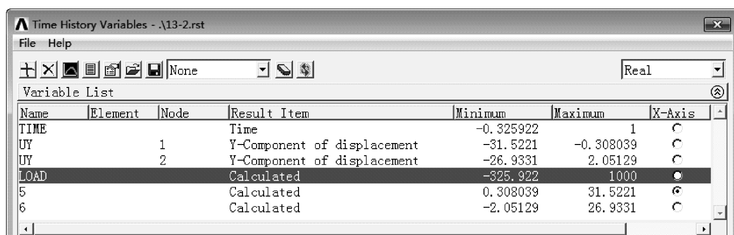


图 16-48　完成变量设置

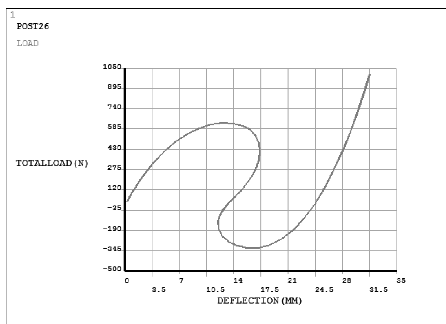


图 16-49　节点 1 荷载—位移曲线

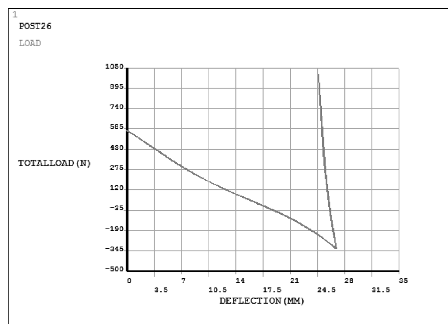


图 16-50　节点 2 荷载—位移曲线

（22）单击工具栏中的 Quit 按钮，弹出 Exit 对话框。选中 Save Everything（保存所有项目）单选按钮，单击 OK 按钮退出 ANSYS。

16.3　本章小结

本章首先介绍了膜结构的建模及分析，其中重点是找形分析的概念以及分析方法。

最后结合实例对大型空间网壳结构进行了建模及分析。通过对本例的学习，读者可以掌握复杂模型的建模方法、结构特征屈曲分析以及非线性分析的具体操作流程。

第 17 章　基础工程分析

基础工程是指采用工程措施，改变或改善基础的天然条件，使之符合设计要求的工程。本章将就房屋建筑中最常见的刚性独立基础，以及考虑摩擦接触的桩基础进行工程分析。

本章学习目标

- 掌握刚性独立基础的建模方法
- 掌握旋转体的建模方法
- 掌握接触单元的使用方法以及摩擦桩的建模方法

17.1　房屋刚性独立基础

房屋独立基础为普通低层房屋常用的基础类型。

17.1.1 独立基础

当建筑物上部采用框架结构或单层排架结构承重时，基础常采用方形、圆柱形和多边形等形式的独立式基础，这类基础称为独立基础，也称单独基础。它是整个或局部结构物下的无筋或配筋基础。一般是指结构柱基、高烟囱、水塔基础等的形式。

独立基础分为如下 3 种。

- 阶形基础。
- 坡形基础。
- 杯形基础。

17.1.2 问题简述

本例为一坡形基础，几何形状如图 17-1 所示。

（1）几何参数。

基础底部面为直径 3 m 的圆形，全高 1.8 m，上部平台直径为 0.6 m，斜坡坡高 1.2 m，坡角 45°，截面形状为圆形。

（2）单元类型及材料属性。

单元类型选用 SOLID65。另外，为方便建模，创建 PLANE182 单元作为过渡性辅助单元。

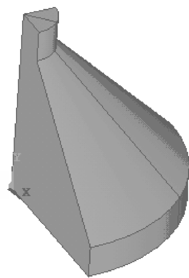


图 17-1　坡形独立基础

桩体材料：线弹性材料，弹性模量为 25 GPa，泊松比为 0.2，密度为 2700 kg/m^3。

土体材料：DP 材料，弹性模量为 25 MPa，泊松比为 0.45，密度为 2000 kg/m^3。黏聚力 c 为 10，摩擦角为 30°，膨胀角为 30°。

17.1.3 前处理

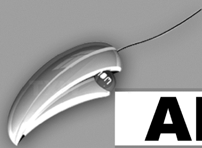
本例采用 APDL 方式进行分析。

（1）定义单元类型及材料属性。

```
FINISH                      !
/CLEAR                      !
/PREP7                      ! 进入前处理器
ET,1,PLANE182               ! 定义过渡单元
ET,2,SOLID65                ! 定义最终材料单元
MP,EX,1,2.5E10              ! 桩的弹性模量
MP,NUXY,1,0.2               ! 桩的泊松比
MP,DENS,1,2700              ! 桩的密度
MP,EX,2,2.5E7               ! 土的弹性模量
MP,NUXY,2,0.45              ! 土的泊松比
MP,DENS,2,2000              ! 土的密度
TB,DP,2                     ! 定义 DP 参数
TBDATA,1,10,30,30           ! 黏聚力 C 为 10,摩擦角为 30°,膨胀角为 30°
```

（2）建立平面模型。

```
K,1                         ! 建立模型关键点
K,2,1.5
K,3,1.5,0.3
K,4,0.3,1.5
K,5,0.3,1.8
K,6,0,1.8
K,7,1.5,1.8
K,8,3,1.8
K,9,3,0
K,10,3,-2
K,11,0,-2
*DO,I,1,5                   ! 连接关键点生成直线
L,I,I+1
*ENDDO
L,1,6
L,3,7
L,5,7
*DO,I,7,10
L,I,I+1
*ENDDO
L,2,9
L,11,1
/PNUM,LINE,1
LPLOT
AL,1,2,3,4,5,6              ! 显示直线编号,以便生成面
AL,3,4,8,7                  ! 绘制直线
AL,2,7,9,10,13              ! 通过线围成基础的面
AL,1,13,11,12,14            ! 生成土体面
/PNUM,AREA,1
```



```
APLOT
AGLUE,ALL
NUMMRG,ALL                    ! 显示面
NUMCMP,ALL                    ! 粘贴各部分
```

生成几何模型如图 17-2 所示。

下面进行网格划分，将其转换成有限元模型。

```
! 划分单元
LSEL,S,,,2,8,1            ! 选择直线 L2 ~ L8
LSEL,U,,,3                ! 在 L2 ~ L8 中去除 L3
LESIZE,ALL,0.15           ! 设定直线划分单元的尺寸
LSEL,S,,,3                ! 选择 L3
LESIZE,ALL,,,10           ! 划分为 10 份
LSEL,S,,,ALL              ! 反选 L2 ~ L8
LSEL,U,,,2,8,1
LESIZE,ALL,0.15           ! 设置其余各直线划分尺寸
AMESH,1,4                 ! 划分面
```

划分生成的有限元面模型如图 17-3 所示。

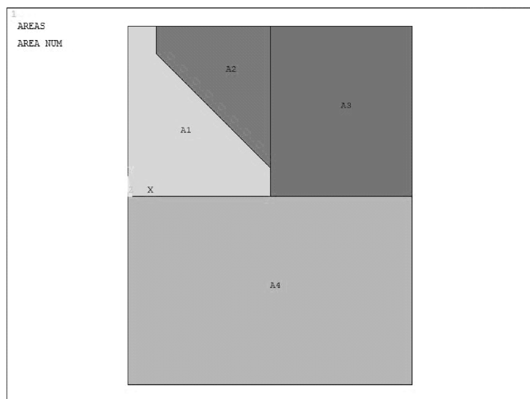


图 17-2 平面几何模型

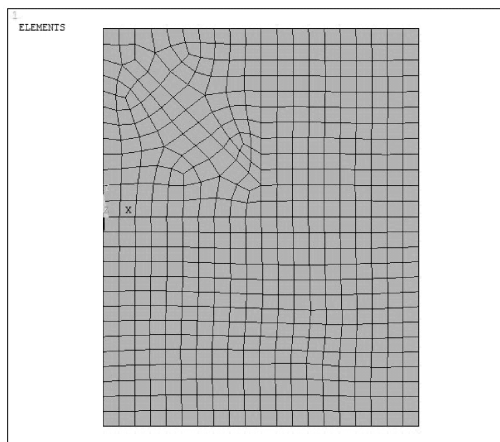


图 17-3 划分后的面

下面进行面的旋转操作，将其生成柱体。

注意：SOLID 单元不能进行 AMESH 操作，因此之前我们一直采用的是 PLANE 单元。

在拉伸操作中，我们要设置拉伸后的生成单元类型。借助这种方式，我们可以将最终的立体模型变化为 SOLID65 单元。

```
EXTOPT,ESIZE,3,0,                  ! 设置拉伸单元份数
EXTOPT,ACLEAR,1                    ! 拉伸后清除多余面
TYPE,2                             ! 拉伸后采用 SOLID65 单元
MAT,1
VROTAT,1,,,,,,6,11,-90,2           ! 将 A1 沿 K6,K11 所在轴负向旋转 90°
TYPE,2                             ! 重新定义单元及材料属性
MAT,2
VROTAT,2,3,4,,,,6,11,-90,2         ! 将 A2 ~ A4 沿 K6,K11 所在轴负向旋转 90°
NUMMRG,ALL                         ! 重复单元的合并
NUMCMP,ALL                         ! 编号的压缩重排
```

```
ALLSEL
/VIEW,1,1,1,1
EPLOT
```

旋转后生成有限元模型。

基础模型如图 17–4 所示，包括地基土的 1/4 模型如图 17–5 所示。

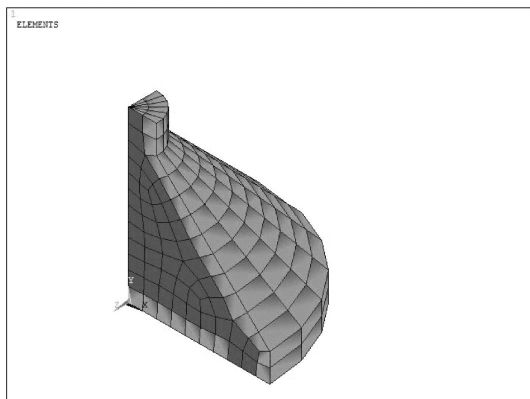


图 17–4　基础模型

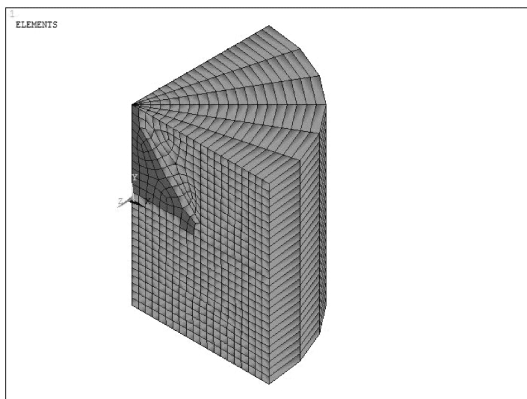


图 17–5　1/4 模型

17.1.4 加载及求解

（1）施加约束。

本例在图 17–5 的整体模型上，对称面 X＝0 和 Z＝0 处施加对称约束。

模型底面 Y＝－2 施加 Y 方向自由度约束。顶面为自由面，其余 3 个侧面约束其 UX，UZ 的平动自由度。

对称面及底面约束情况如图 17–6 对称面及底面约束所示。外侧立面约束如图 17–7 所示。

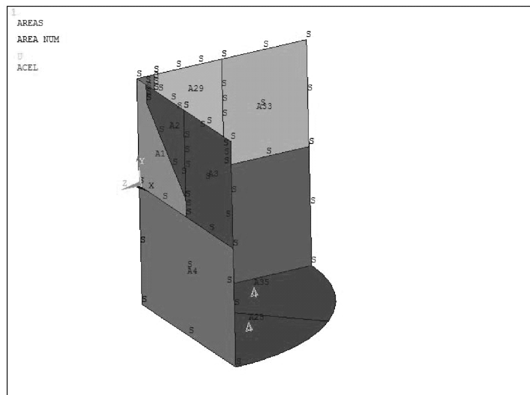


图 17–6　对称面及底面约束

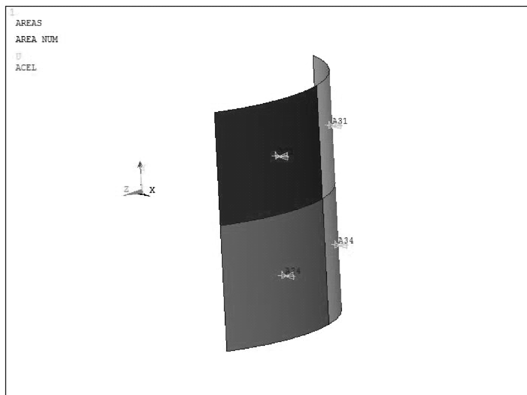


图 17–7　外侧立面约束

具体约束命令如下。

```
/SOLU                          ! 进入求解模块
! 施加对称约束
ASEL,S,LOC,X,0                 ! 选择 X = 0 的面
ASEL,A,LOC,Z,0                 ! 选择 Z = 0 的面
DA,ALL,SYMM                    ! 施加对称约束
! 约束底面
ASEL,S,LOC,Y, -2
DA,ALL,UY
! 施加水平方向约束
ASEL,S,,,21,31,10
ASEL,A,,,24,34,10
DA,ALL,UX
DA,ALL,UZ
```

（2）施加重力荷载。

模型受荷载分两个 Step，第 1 步为受重力荷载，第 2 步添加上部传递到基础顶面的荷载。我们先进行第 1 步分析。

```
ALLSEL                         ! 拾取所有实体
ACEL,0,9.8,0                   ! 施加沿 Y 轴重力加速度
SOLVE                          ! 求解
FINISH
```

进行后处理时，选择 FIRST SET 即可查看本步结果。

（3）施加上部荷载。

```
/SOLU                          ! 重新进入求解模块
ASEL,S,,,9,15,6                ! 选择基础顶面
SFA,ALL,4,PRES,,50000          ! 对面施加压力
! 设置求解项
ANTYPE,STATIC                  ! 分析类型为静力分析
TIME,1                         ! 加载时间 1s
NSUB,100                       ! 荷载子步数 100
OUTRES,ALL,ALL                 ! 结果输出设置
ALLSEL                         !
GPLOT                          ! 绘图设置
SOLVE                          ! 开始求解
FINISH                         !
```

施加荷载效果如图 17-8 所示。

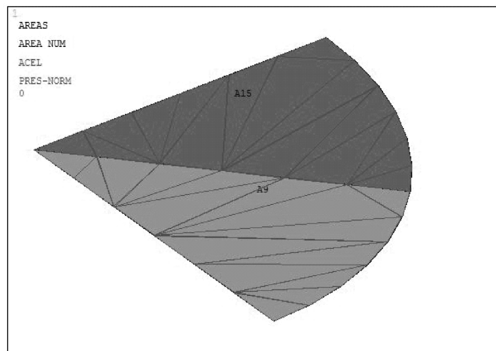


图 17-8　施加面荷载

17.1.5 后处理

（1）自重荷载下的受力及变形。

```
/POST1                    ! 进入通用后处理器
SET,FIRST,FIRST           ! 读取第 1 子步数据
PLNSOL,U,Y                ! 绘制 Y 方向位移云图
PLNSOL,S,Y,0,1            ! 绘制 Y 方向应力云图
PLNSOL,S,EQV,0,1          ! 等效应力云图
/PBC,ALL,,0               ! 进行边界及支反力的显示操作
/PBC,NFOR,,1              !
/PBC,NMOM,,1              !
/PBC,RFOR,,1              !
/PBC,RMOM,,1              !
/PBC,PATH,,1
```

得到各结果，沉降分布云图如图 17-9 所示，Y 方向应力云图如图 17-10 所示。

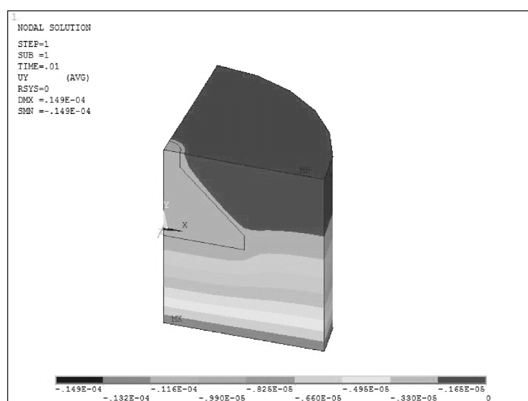


图 17-9　自重荷载下的沉降分布云图

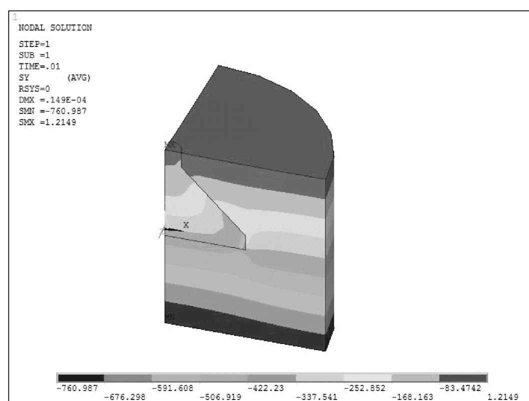


图 17-10　自重荷载下 Y 方向应力云图

自重荷载下沉降值很小，UY = -0.149E-4 m。自重应力最大值为压应力，大小为 SY = 760.987 Pa。

得到自重荷载下的等效应力如图 17-11 所示，支反力分布如图 17-12 所示。

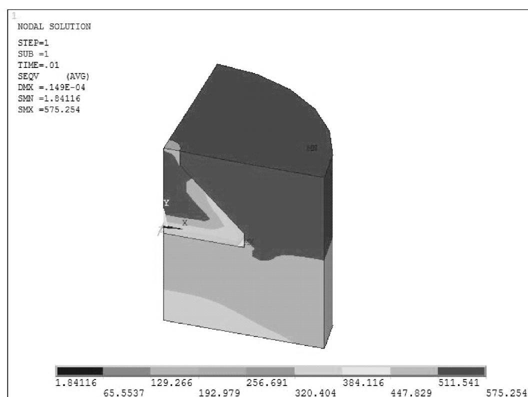


图 17-11　自重荷载下的等效应力

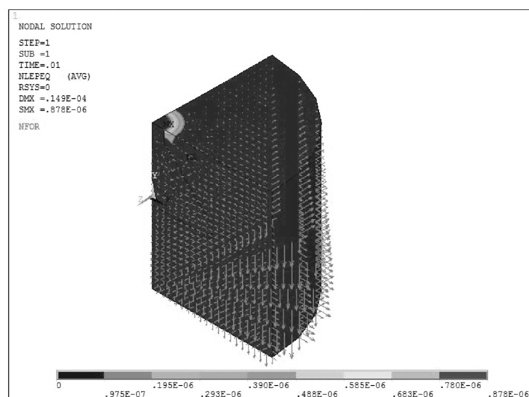
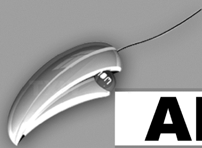


图 17-12　支反力分布



（2）施加荷载后的最终计算结果。

读入最后一个计算步的数据，即得到了最终的计算结果。命令流如下。

```
SET,LAST                        ! 读取最后一步的数据
PLNSOL,U,Y                      ! Y 方向位移云图
PLNSOL,S,Y,0,1                  ! Y 方向应力云图
PLNSOL,S,EQV,0,1                ! 等效应力
PLNSOL,NL,EPEQ,0,1              ! 累计塑性变形云图
```

最终沉降分布如图 17–13 所示，Y 方向应力分布如图 17–14 所示。

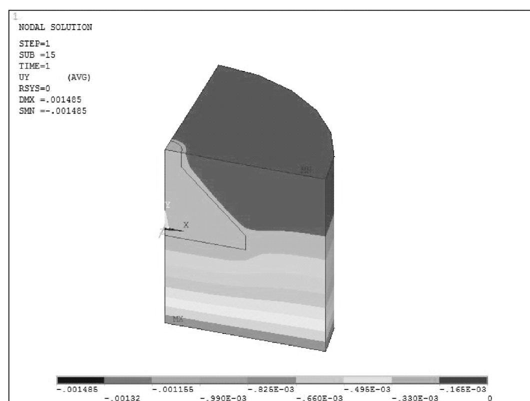


图 17–13　最终沉降分布图

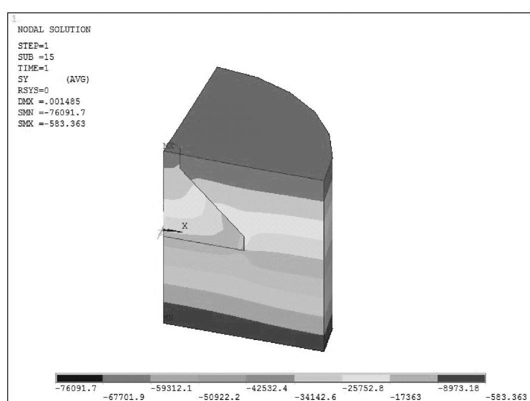


图 17–14　Y 方向应力分布

上部荷载下沉降值很小，UY = –0. 001485 m。

应力最大值为压应力，大小为 SY = 76091. 7 Pa。地表一层土由于基础的下陷，产生了拉应力。

等效应力云图如图 17–15 所示，累计塑性应变云图如图 17–16 所示。

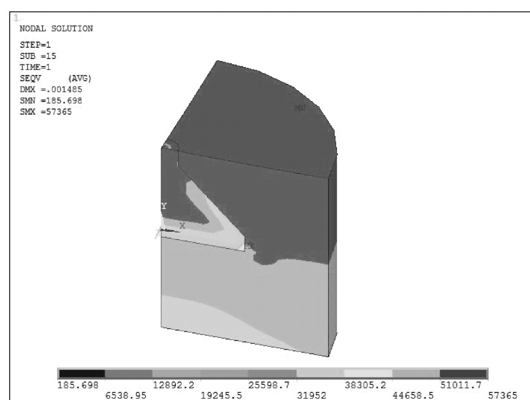


图 17–15　等效应力云图

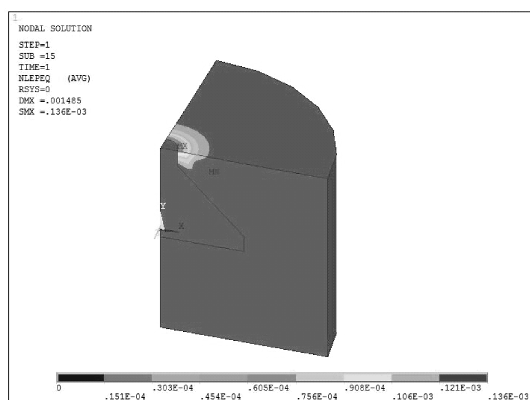


图 17–16　累计塑性应变云图

由等效应力云图可以清晰地看出，放大脚边缘点和顶点边缘处最容易发生塑性变形。

（3）查看上部荷载单独影响。

用户也可以通过对不同荷载步的计算结果的操作，单独查看外荷载的影响。

```
LCDEF,1,1,1,            ! 将第 1 个子步定义为荷载工况 1
LCDEF,2,1,15            ! 第 15 步为工况 2
LCASE,2                 ! 调入第 2 工况
LCOPER,SUB,1            ! 减去第 1 工况
PLNSOL,U,Y              ! 绘制 Y 向位移云图
PLNSOL,S,Y,0,1          绘制 Y 向应力
```

上部荷载产生的位移如图 17-17 所示，上部荷载产生的应力如图 17-18 所示。

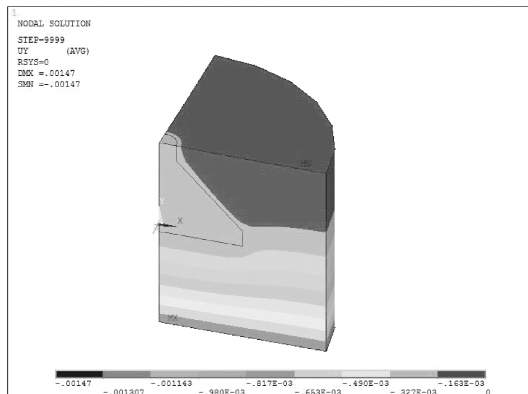


图 17-17　上部荷载产生的位移

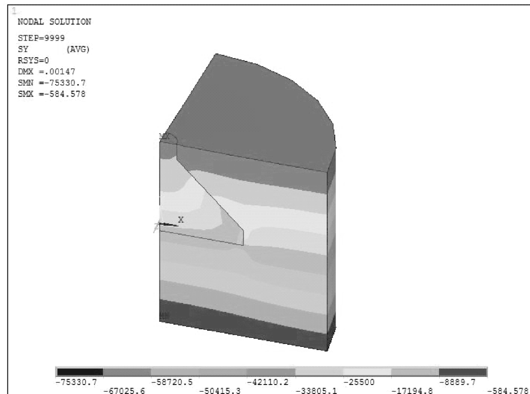


图 17-18　上部荷载产生的应力

本节主要以命令流为主进行了建模及分析，其方便性相信读者已深有体会。

17.2　考虑摩擦接触的桩基础分析

摩擦桩是完全设置在软土层一定深度的一种桩，上部结构荷载要由桩尖阻力和桩身侧面与土之间的摩擦力共同来承担。

本节将考虑桩土相互作用进行桩基础的建模与分析。

17.2.1　问题简述

摩擦型桩可分为摩擦桩和端承摩擦桩。桩端阻力可忽略时称为摩擦桩，桩端阻力不可忽略时称为端承摩擦桩。

同理，端承型桩也可分为端承桩和摩擦端承桩，桩侧阻力可忽略时称为端承桩，桩侧阻力不可忽略时称为摩擦端承桩。

本节以一混凝土方桩为例，考虑桩土摩擦，进行分析计算。

（1）几何参数。

桩长 8 m，断面尺寸 2 m × 2 m，入土深度 6 m。

（2）材料特性及参数。

① 桩为线弹性材料：

弹性模量 25 GPa，泊松比 0.2，密度 2500 kg/m^3。

② 土体采用 DP 材料：

弹性模量 0.25 GPa，泊松比 0.4，密度 2000 kg/m³；

黏聚力为 19，摩擦角为 32°，膨胀角为 30°。

（3）对于接触分析模型

模型采用 1/2 剖面，土体和桩体选用 SOLID65 单元。对桩身与土体的作用进行接触分析，桩身本构关系采用线弹性，而土体本构采用 DP 模型。

接触面上的刚体目标面选用 TARGE170 单元，接触面选用 CONTA173 单元。

17.2.2 单元及材料属性设定

（1）启动 Mechanical APDL Proclict Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Environment、Lisence、Working Directory，在 Job Name 框中输入 Friction Pile。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preferences 命令，在弹出的对话框中选中 Structural。

（2）定义单元类型。本例中土体和柱体选用 SOLID65 单元。为了建模时可以使用拉伸功能，先定义辅助单元 PLANE182。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，利用弹出的对话框添加单元 PLANE182 为 1 号单元。以同样的方法将 SOLID65 设置为 2 号单元。

命令流如下。

```
/PREP7
ET,1,PLANE182
ET,2,SOLID65
```

（3）定义桩体材料属性。

桩体材料为线弹性。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的对话框中设置 EX 为 25E9，PRXY 为 0.2；在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Density，在弹出的对话框中设置材料密度为 2500，单击 OK 按钮完成设置。

桩的设定命令流如下。

```
MP,EX,1,2.5E10                    ! 桩的弹性模量
MP,NUXY,1,0.2                     ! 桩的泊松比
MP,DENS,1,2500                    ! 桩的密度
```

（4）定义土体材料属性。

土体采用 DP 本构模型材料。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

先设定弹性参数。在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的对话框中设置 EX 为 0.25E9，PRXY 为 0.4；在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Density，在弹出的对话框中设置材料密度 2000，单击 OK 按钮完成设置。

土体的弹性参数命令流如下。

```
MP,EX,2,2.5E8              ! 土的弹性模量
MP,NUXY,2,0.4              ! 土的泊松比
MP,DENS,2,2000             ! 土的密度
```

设定摩擦系数。在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Friction Cohesion，在弹出的对话框中设置 MU = 0.2。

设定 DP 参数。在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Nonlinear > Inelastic > Non - metal Plastic > Drucker - Prager，在弹出的对话框中设置 Cohesion = 19，Fric Angle = 32，Flow Angle = 30。

命令流如下：

```
TB,DP,2
TBDATA,1,19,32,30       ! 黏聚力 C 为 19,摩擦角为 32°,膨胀角为 30°
```

17.2.3 建模

（1）建立平面几何模型。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Dimensions，生成模型各部分几何体。

在弹出的对话框中设置 X1,X2 = 0,1；Y1,Y2 = 0,8，单击 OK 按钮，生成桩的平面几何模型。以同样的方式，设置 X1,X2 = 1,5；Y1,Y2 = 0,6，单击 OK 按钮，生成桩侧土体；设置 X1,X2 = 0,5，Y1,Y2 = 0, - 16，单击 OK 按钮，生成桩下土体。

相应命令为 RECTING，具体使用方法如下。

```
RECTNG,0,1,0,8,          ! 生成面 1
RECTNG,1,5,0,6,          ! 生成面 2
RECTNG,0,5,0,-16,        ! 生成面 3
```

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Glue > Areas，拾取 a2、a3 两个土体部分，将其黏合。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Compress Numbers 对重叠元素压缩编号。完成后模型如图 17-19 所示。

相关命令流如下：

```
/PNUM,AREA,1            ! 显示面编号
/PNUM,LINE,1            ! 显示线编号
ASEL,S,,,2,3,1          ! 选择面
AGLUE,ALL               ! 黏合面
NUMCMP,ALL              ! 压缩编号
ALLSEL                  !
APLOT                   !
```

注意：此处不可将 a1 黏合，否则无法进行接触面的接触单元设置。

（2）划分平面。

设置桩所在平面划分尺寸。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > Picked Lines，拾取桩上直线 L1、L3，单击 OK 按钮，在弹出的对话框中将 NDIV 设置为 2。以同样的方式拾取 L2、L4，划分 NDIV = 2。

命令流如下。

```
LSEL,S,,,1,3,2
LESIZE,ALL,,,2
LSEL,S,,,2,4,2
LESIZE,ALL,,,16
```

设置土体平面划分尺寸。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > Picked Lines，拾取直线 L5 ~ L12，设置划分尺寸 Size = 1。

```
LSEL,S,,,5,12,1
LESIZE,ALL,1
```

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 Sided，拾取各平面，单击 OK 按钮，完成网格划分。

划分面网格的命令如下。

```
AMESH,1
```

生成初步模型，如图 17-20 所示。

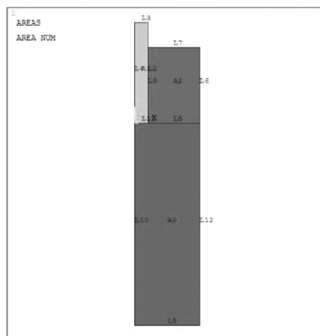


图 17-19　几何面模型

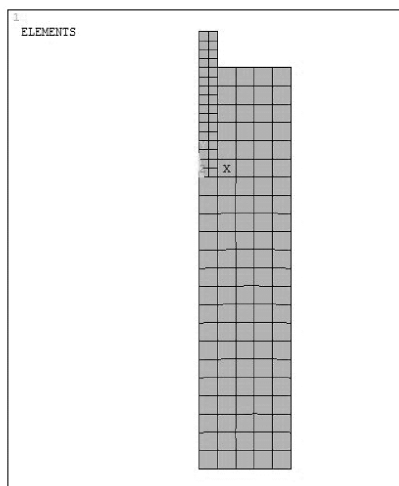


图 17-20　有限元面模型

(3) 拉伸成体。

先将桩平面拉伸成体。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Elem Ext Opts 命令，在弹出的 Element Extvusion Options 对话框中设置拉伸后目标单元为 2 SOLID65，材料编号选择 1，单元尺寸设置为 2，如图 17-21 所示。单击 OK 按钮，完成设置。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > By XYZ Offset，选择桩平面，单击 OK 按钮，在弹出的对话框中的 DX、DY、DZ 框中分别输入 0、0、-1，单击 OK 按钮，完成拉伸。

拉伸土体平面 a2、a3。通过同样的路径，设置目标单元为 2 SOLID65，材料编号选择 2，单元尺寸设置为 2，单击 OK 按钮，完成拉伸。

相应的命令流如下。

```
EXTOPT,ESIZE,2,0,               ! 拉伸成体 1
EXTOPT,ACLEAR,1
TYPE,2
MAT,1
VEXT,1,,,,,-1
EXTOPT,ESIZE,2,0,               ! 拉伸成体 2,3
EXTOPT,ACLEAR,1
MAT,2
VEXT,2,3,1,,,-1
ALLSEL
/VIEW,1,1,1,1
EPLOT
```

拉伸后模型如图 17-22 所示。

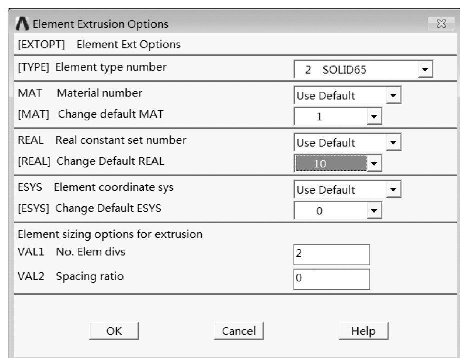


图 17-21 拉伸单元设置

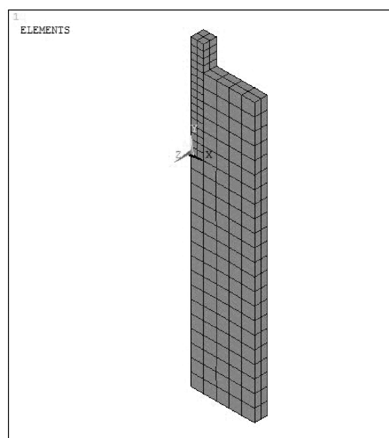


图 17-22 拉伸后的模型

（4）生成桩后土体。

桩后土体模型直接生成与之前模型相适应的长方体即可，生成步骤及材料参数同桩侧土体，此处不再赘述。生成两侧面模型如图 17-23 所示。

相应命令流如下。

```
K,1001,5,6,-5               ! 建立桩后土体
K,1002,5,0,-5
K,1003,5,-16,-5
L,18,1001
L,1001,1002
L,1002,17
L,1002,1003
L,1003,21
AL,22,36,37,38              ! 面 4 和面 5
AL,30,38,39,40
EXTOPT,ESIZE,10,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
VEXT,19,20,1,-5             ! 拉伸成体 4 和 5
VPLOT
VSEL,S,,,4,5,1
VPLOT
```

```
LSEL,S,,,36,52,1
LESIZE,ALL,1
TYPE,2
MAT,2
VMESH,ALL                    ! 划分体 4 和 5
ALLSEL
ALLSEL
```

拉伸成体并划分尺寸后如图 17-24 所示。

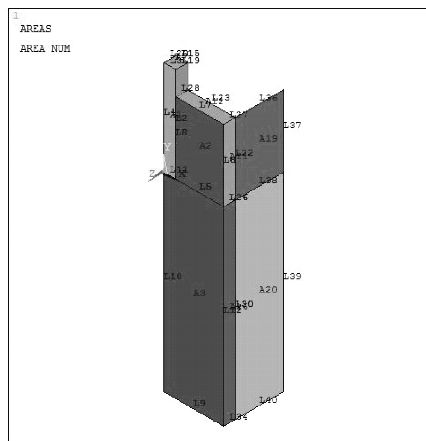


图 17-23 桩后土体侧面

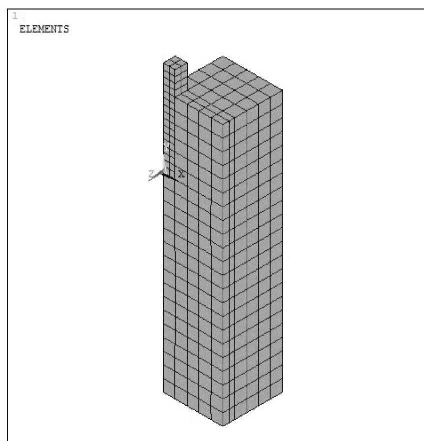


图 17-24 1/4 模型

（5）生成 1/2 模型。

通过镜像命令，可以很方便地生成 1/2 模型。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Volumes 命令，在弹出的拾取对话框中单击 Pick All 按钮，拾取所有实体。在弹出的 Reflect Volumes 对话框，勾选 Y - Z Plane X 项，即以 YZ 平面为对称面，进行镜像生成。其余选项按默认处理。

镜像生成模型命令流如下。

```
ALLSEL
VSYMM,X,ALL,,,,0,0
```

（6）对模型进行整理。

模型生成后，针对所有土体部分进行重复单元的合并及编号的压缩整理。注意此时不可将桩体带入，否则无法进行接触单元的设置。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Merge Items，选择除桩以外的所有对象，进行重复单元的合并。同样，通过路径 Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Compress Numbers 对土体部分进行编号压缩。

命令流如下。

```
VSEL,S,,,ALL,,1          !选择目标体
VSEL,U,,,1,6,5
VPLOT                    !绘制目标体
ESLV,S                   !选择体上单元
```

```
NSLV,S,1                    !选择单元上节点
EPLOT                       !
NUMMRG,ALL                  !合并重复单元和节点
NUMCMP,ALL                  !压缩编号
ALLSEL                      !
```

最后的模型如图 17-25 所示。

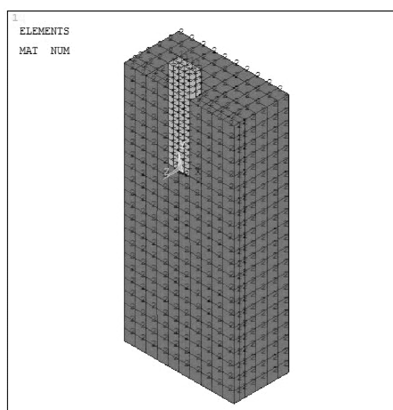


图 17-25 1/2 有限元模型

(7) 生成接触单元。

土体与桩之间的相互作用用接触单元来模拟。本例接触面上的刚体目标面选用 TARGE170 单元，接触面选用 CONTA173 单元，设置方法如下。

定义接触单元。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，添加 3 号单元，依次选取 CONTACT > 3D TARGE170；添加 4 号单元为 CONTACT 4nd surf 173。回到 Element Types 对话框，选择 COTA173 单元，单击 Options 按钮进行编辑。在弹出的对话框中设置 K9 为 include，K12 为 No separation。单击 OK 按钮完成设置，并退出 Element Types 对话框。

相应命令流如下。

```
ALLSEL                      !
ET,3,170                    !设置目标单元
ET,4,173                    !设置接触单元
KEYOPT,4,9,0                !设置 4 号单元的 K9 项
KEYOPT,4,12,2               !设置 4 号单元的 K12 项
```

为接触单元定义实常数 r10。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete 未完成，其各项值默认即可。

定义摩擦系数。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Friction Cohesion，在弹出的对话框中设置 MU = 0.2。

命令流如下。

```
R,10
REAL,10
MP,MU,2,0.2
```

为接触面目标单元定义属性。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes，将单元属性定义为 TYPE3。

生成接触面目标单元。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，在弹出的对话框中设置拾取目标为面，选取桩体与地基接触的 6 个面——a4、a5、a6、a31、a32、a33。再将拾取目标改为节点，拾取方式选择 Attached to,areas，这样就将 6 个面上的节点选中了。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Surf / Contact > Node to Surf 命令，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，通过已选取的节点生成目标单元，如图 17-26 所示。

生成接触面目标单元的命令流如下。

```
VSEL,S,,,1,6,5
VPLOT
ASEL,S,,,4,6,1
ASEL,A,,,31,33,1
APLOT
CM,TARGET,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESURF,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
```

生成接触面接触单元。选取与桩接触的土体上的 6 个面 a5、a13、a22、a41、a46、a50，方法同上。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes，将单元属性定义为 TYPE4。拾取其上所有节点，依附于节点生成单元，方法同上。生成接触单元如图 17-27 所示。

生成接触面接触单元的命令流如下。

```
VSEL,S,,,ALL
VSEL,U,,,1,6,5
VPLOT
ASEL,S,,,5
ASEL,A,,,13
ASEL,A,,,22
ASEL,A,,,50
ASEL,A,,,41
ASEL,A,,,46
APLOT
CM,CONTACT,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESURF,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
EPLOT
/PSYMS,ESYS,1
ALLSEL
GPLOT
FINISH
```

建模完成。

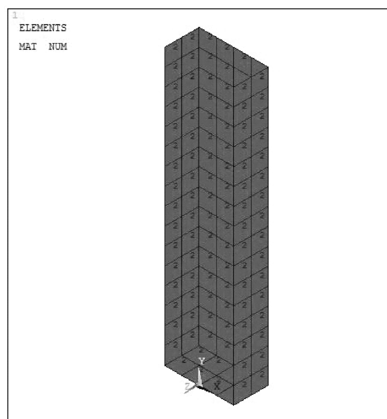


图 17-26 目标单元

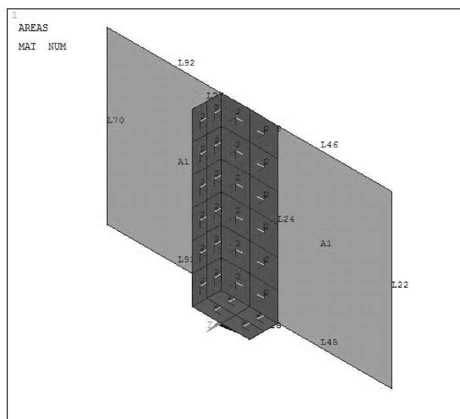


图 17-27 接触单元

17.2.4 加载及求解

（1）施加约束。

通过路径 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas，拾取模型左右两外侧、背面和底面 4 个面。按位置来说，分别是 X = -5、X = 5、Z = -5、Y = -16 4 个面。单击 OK 按钮完成拾取后，在弹出的添加约束对话框中选择 All DOF，单击 OK 按钮。通过路径 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > Symmetry B. C > On Areas，拾取对称面上所有的面，即 Z = 0 的面，施加对称约束。

```
/SOLU                    !进入求解模块
ASEL,S,LOC,X,5           !选择要约束的面
ASEL,A,LOC,X,-5          !
DA,ALL,ALL               !施加约束
APLOT                    !
ASEL,S,LOC,Z,0           !选择对称面
DA,ALL,SYMM              !施加对称约束
ASEL,S,LOC,Z,-5          !
DA,ALL,ALL               !
ASEL,S,LOC,Y,-16         !
DA,ALL,ALL               !
ALLSEL                   !
```

（2）施加荷载。

施加重力荷载。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Gravity > Global 命令，在弹出对话框的 ACELY Global Cartesian Y - Comp 框内输入 9.8，单击 OK 按钮。

施加上部荷载。通过路径 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Areas，选择桩的上表面，施加压力 30e4。

命令流如下。

```
ACEL,0,9.8,0,             !施加重力加速度
ASEL,S,LOC,Y,8            !选择桩上表面
SFA,ALL,3,PRES,30E4       !施加上部荷载
```

（3）设置分析类型与相关选项。

首先设置分析类型。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，在弹出的对话框中选择分析类型为 Static。

接下来，进行相关分析选项的设置。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Basic 命令，弹出如图 17-28 所示 Solution Controls 对话框。

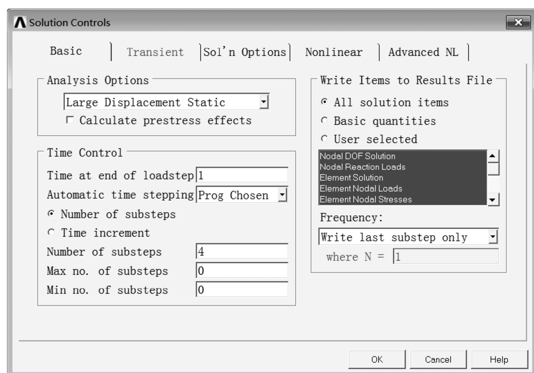


图 17-28　分析选项设置

在 Analysis Options 选项组的下拉列表框中选择 Large Displacement Seatic（静力大变形）；在 Time Control 选项组中，设置 Time at end of loadstep 为 1，Number of substeps 为 30；在 Write Items to Results File 选项组中，选中 All solution items 单选按钮，在 Frequency 下拉列表框中选择 Write every substep。完成设置后，单击 OK 按钮退出对话框。

相应命令流如下：

```
ANTYPE,STATIC            !设置分析类型
NLGEOM,ON                !打开大变形分析
TIME,1
NSUB,30
OUTRES,ALL,ALL
```

（4）求解。

通过路径 Main Menu > Solution > Solve > Current LS，开始求解。

命令流如下：

```
ALLSEL
SOLV          !求解
FINISH
```

17.2.5 后处理

（1）位移分布图。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，在弹出的对话框中选择 DOF Solution Y - Component of displacement，得到如图 17-29 所示的 Y 向位移云图。选择 Displacement vector sum，得到如图 17-30 所示位移总云图。

相应的命令流如下。

```
/POST1                      !进入通用后处理器
PLNSOL,U,Y,0,1.0            !绘制 Y 向位移云图
PLNSOL,U,SUM,0,1.0          !总位移云图
```

由图可见，沉降值为0.354E－4，值很小。在2 m宽的桩的正下方，其沉降分布反而相对桩边缘较小。沉降云图呈现出桩侧两斜椭圆。

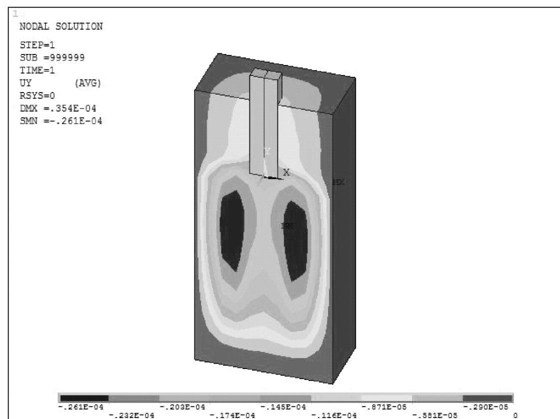


图 17-29 Y 方向位移云图

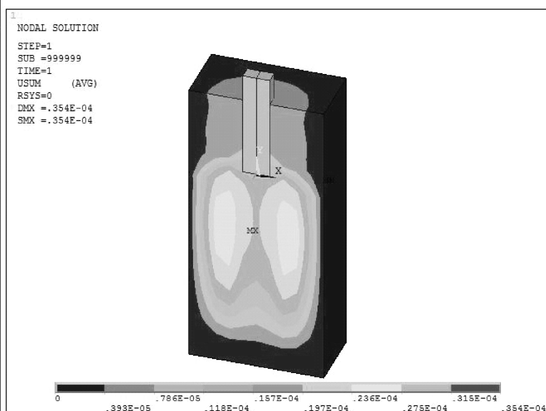


图 17-30 位移总云图

（2）应力分布。

通过路径 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu，在弹出的对话框中选择 Stress，可得到各方向应力分布云图。第1主应力如图17-31所示，第3主应力如图17-32所示。

相应的命令流如下。

```
PLNSOL,S,1,0,1.0
PLNSOL,S,1,0,3.0
```

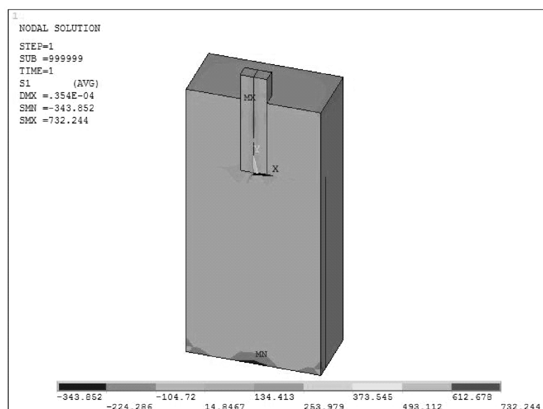


图 17-31 第1主应力

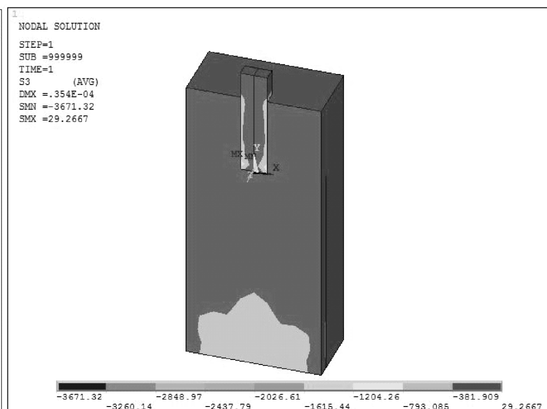


图 17-32 第3主应力

（3）应力分布曲线。

通过 Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > By Location，定义路

径 p1。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > Modify Path 命令，在弹出的对话框中输入路径上第一个点的坐标（0，0，0），定义路径终点（0，-16，0），即所求路径沿桩向地基深处延伸。

通过路径 Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > Path Status > Current Path，定义 X 方向和 Y 方向的应力为要进行绘制的沿路径分布的项。

定义路径及目标项的命令如下：

```
ESEL,S,TYPE,1                !按照单元号选择实体
PATH,P1,2                    !定义路径
PPATH,1,,0,0,0               !路径起点
PPATH,2,,0,-16,0             !路径终点
PDEF,SY,S,Y                  !Y 方向应力
PDEF,SX,S,X                  !X 方向应力
PDEF,S1,S,1                  !第 1 主应力
PDEF,UY,U,Y                  !Y 方向位移
```

通过路径 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Plot Path Item > On Graph 绘制定义好的路径及要显示的项，分别得到沿地基深度方向分布的 X 方向应力（见图 17-33）、Y 方向应力（见图 17-34）。

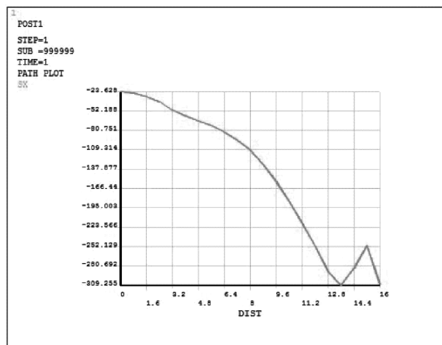


图 17-33　X 方向应力分量沿深度分布曲线

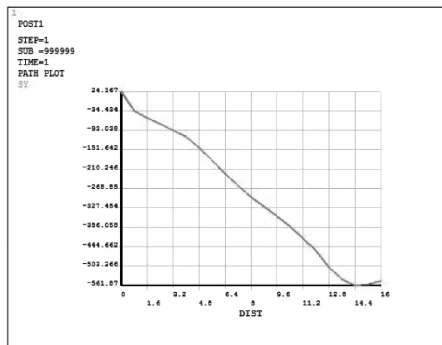


图 17-34　Y 方向应力分量沿深度分布曲线

得到第 1 主应力沿深度方向分布曲线，如图 17-35 所示。得到沿深度方向的沉降分布曲线，如图 17-36 所示。

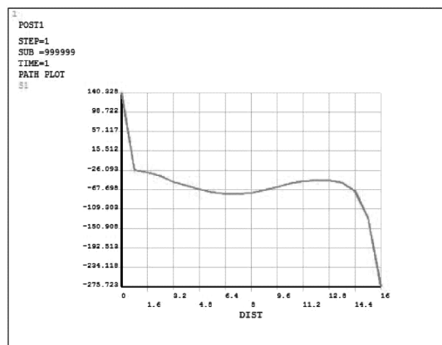


图 17-35　第 1 主应力沿深度方向分布曲线

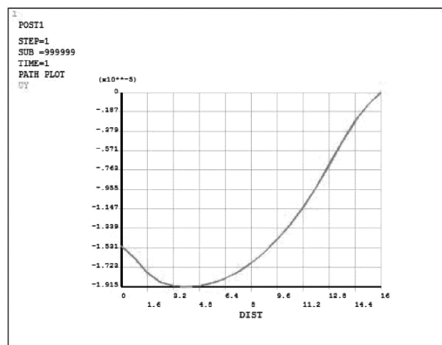


图 17-36　沉降曲线

以上绘制曲线的命令流如下。

```
PLPATH,SX            !绘制各路径图
PLPATH,SY
PLPATH,S1
PLPATH,UY
```

17.3 本章小结

本章学习了基础工程中常见问题的建模及分析方法。首先对房屋刚性独立基础进行了建模及静力分析，其中要重点掌握的是如何在建模过程中使用旋转生成体的方法；然后对考虑摩擦接触的桩基础进行了分析，其中重点是接触单元的使用方法以及摩擦桩的建模方法。

第 18 章 桥梁工程实例分析

桥梁工程是土木工程中与交通直接相关的重要工程形式。随着经济的发展，快捷便利的交通已经越来越受到重视，而不论是跨河、跨海大桥，还是城市轨道交通桥、高架桥等，通过跨越的方式真正将天堑变为通途。本章将针对桥梁工程中的典型实例进行仿真分析。

本章学习目标

- 掌握钢桁架桥的建模及静力分析方法
- 掌握大跨度悬索桥的建模方法
- 学习悬索桥的地震动力响应分析方法

18.1 钢桁架桥

桁架桥（Truss Bridge）指的是以桁架作为上部结构主要承重构件的桥梁。

桁架桥一般由主桥架、上下水平纵向连接系、桥门架、中间横撑架以及桥面系组成。在桁架中，弦杆是组成桁架外围的杆件，包括上弦杆和下弦杆。连接上、下弦杆的杆件叫做腹杆。它按方向不同又分为斜杆和竖杆。弦杆与腹杆所在的平面就叫主桁平面。

大跨度桥架的桥高沿跨径方向变化，形成曲弦桁架；中、小跨度采用不变的桁高，即所谓平弦桁架或直弦桁架。

18.1.1 问题简述

（1）几何尺寸。

如图 18-1 所示一桁架结构桥梁，全长 32 m，每一节水平段长 4 m，桁架高 5.5 m。

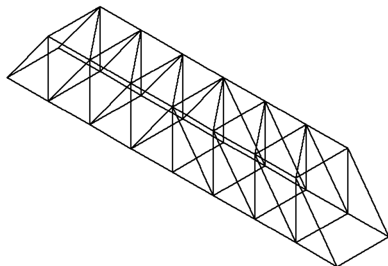


图 18-1 桁架桥上部结构

（2）单元及材料属性。

① 桁架：采用 BEAM188 单元，共 3 种不同尺寸的工字型截面。

材料属性：钢材，弹性模量 EX =2.1E11，泊松比为 0.30，密度为 7800。

② 桥面板：采用 SHELL181 单元，厚度为 0.3 m。

材料属性：混凝土板，弹性模量 EX =3.5E10，泊松比为 0.18，密度为 2500。

18.1.2 前处理

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Producc Launcher 窗口中分别设置 Simucation Environment、Lisence、Working、Directory，在 Job Name 框中输入 Truss Bridge。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preferences 命令，在弹出的对话框中选中 Structural。

（2）定义单元类型。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，利用弹出的对话框添加单元 BEAM188 为 1 号单元，添加单元 SHELL181 为 2 号单元。

回到 Element Types 对话框，定义单元特性。选择 BEAM188，单击 Options 按钮，在弹出的对话框中设置 K3 为 Quadradic Form。

相应命令流如下。

```
/PREP7                    !进入前处理器
ET,1,BEAM188              !定义单元类型
KEYOPT,1,3,2
ET,2,SHELL181
KEYOPT,1,3,2
```

（3）定义材料属性。

本例需要定义 2 种材料，桁架为型钢，桥面板为混凝土。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的对话框中设置弹性模量 EX =2.1E11，泊松比 PRXY =0.30，单击 OK 按钮。

在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Density 命令，在弹出的对话框中设置材料密度为 7800，单击 OK 按钮。

通用相同的路径建立材料 2，其各项参数为弹性模量 EX =3.5E10，泊松比 0.18，密度为 2500。

相应命令流如下。

```
MP,EX,1,2.1E11            !定义材料弹性模量
MP,PRXY,1,0.30            !定义材料泊松比
MP,DENS,1,7800            !定义材料密度
MP,EX,2,3.5E10            !定义材料弹性模量
MP,PRXY,2,0.18            !定义材料泊松比
MP,DENS,2,2500            !定义材料密度
```

（4）定义截面。

为各桁架杆件定义截面。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Beam > Common Section 命令，在弹出的对话框中设置截面 ID 为 1，截面形状为 I 型，在下面的一系列输入框内依次输入尺寸参数 0.4、0.4、0.4、0.02、0.02、0.02。

继续定义 ID = 2，I 型截面，依次输入 0.4、0.4、0.4、0.016、0.016、0.016。

定义 ID = 3，依次输入 0.3、0.3、0.3、0.016、0.016、0.016。

定义桥面板截面：Main Menu > Preprocessor > Sections > Shell > Lay – up > Add / Edit，在弹出的对话框中定义 ID = 4，Thickness = 0.3，Material ID = 2。

命令流如下：

```
SECTYPE,  1,BEAM,I,,0            !定义 BEAM 截面特性
SECOFFSET,CENT
SECDATA,0.4,0.4,0.4,0.02,0.02,0.02,
SECTYPE,  2,BEAM,I,,0
SECOFFSET,CENT
SECDATA,0.4,0.4,0.4,0.016,0.016,0.016,0,
SECTYPE,  3,BEAM,I,,0
SECOFFSET,CENT
SECDATA,0.3,0.3,0.3,0.016,0.016,0.016,0
SECT,4,SHELL
SECDATA,0.3,2,,1
```

（5）建立模型。

本例通过命令流建模。

先建立单面桁架。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS，生成关键点。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line，生成直线。

相应命令流如下。

```
!定义几何关键点
K,1,0,0,,
K,2,4,0,,
K,3,8,0,,
K,4,12,0,,
K,5,16,0,,
K,6,20,0,,
K,7,24,0,,
K,8,28,0,,
K,9,32,0,,
K,10,4,5.5,,
K,11,8,5.5,,
K,12,12,5.5,,
K,13,16,5.5,,
K,14,20,5.5,,
K,15,24,5.5,,
K,16,28,5.5,,
!通过几何点生成桥底梁的线
L,1,2
```

```
L,2,3
L,3,4
L,4,5
L,5,6
L,6,7
L,7,8
L,8,9
!生成桥顶梁和侧梁的线
L,9,16
L,15,16
L,14,15
L,13,14
L,12,13
L,11,12
L,10,11
L,1,10
!生成桥身弦杆的线
L,2,10
L,3,10
L,3,11
L,4,11
L,4,12
L,4,13
L,5,13
L,6,13
L,6,14
L,6,15
L,7,15
L,7,16
L,8,16
```

生成几何模型如图 18-2 所示。

通过选取直线，完成网格属性及尺寸控制。

命令流如下。

```
LSEL,S,,,9,16,1,                !拾取直线
    LATT,1,,1,,,,2              !赋属性,截面为 2 号
    LSEL,S,,,17,29,1,
    LATT,1,,1,,,,3              !截面为 3 号
    LSEL,S,,,1,8,1,
    LATT,1,,1,,,,1              !截面为 1 号
    AllSEL,all
    LESIZE,all,,,1,,,,,1        !控制网格份数
    LMESH,all                   !划分网格
```

划分网格后如图 18-3 所示。

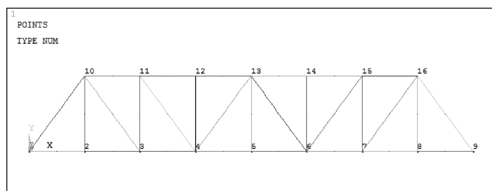


图 18-2　生成单排几何模型

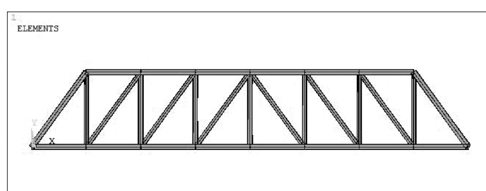


图 18-3　划分网格后的模型

通过复制，生成另一侧的桁架。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Lines 命令，拾取所有直线，在弹出的对话框中设置 ITIME = 2，NOELEM 为 Lines and mesh，在 DZ 框中输入 5。

复制生成单元如图 18-4 所示。此时复制生成的模型包括关键点、直线、节点、单元，均按照原型的单元材料属性与网格特性进行了复制与生成。

再连接两排桁架的对应点，形成桁架整体。

命令流如下。

```
LGEN,2,ALL,,,,,5,,              !复制命令
SECNUM,2                        !定义当前截面类型为 2 型
*DO,I,1,16                      !循环生成横向杆件
E,I,I+16
*ENDDO
*DO,I,11,16                     !循环生成顶部斜支撑
E,I,I+15
*ENDDO
E,11,26
```

生成整体桁架模型，如图 18-5 所示。

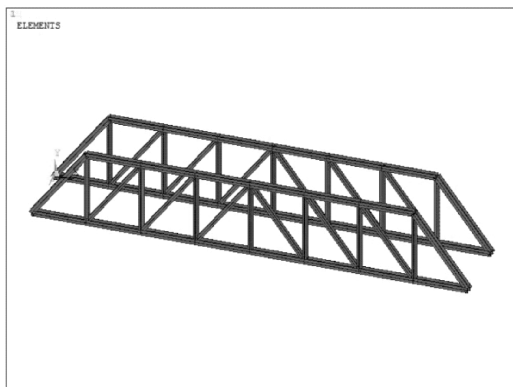


图 18-4　复制生成单元

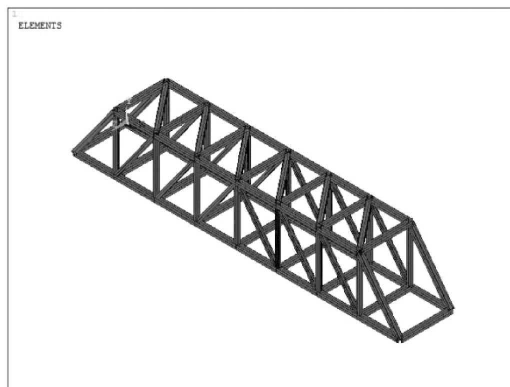


图 18-5　完整的桁架

通过 4 节点，直接生成桥面板单元。

命令流如下。

```
TYPE,2                  !为桥面板指定单元类型及材料
MAT,2
SECNUM,4
E,1,17,18,2             !生成板
E,2,18,19,3
E,3,19,20,4
E,4,20,21,5
E,5,21,22,6
E,6,22,23,7
E,7,23,24,8
E,8,24,25,9
```

建模结束，如图 18-6 所示。

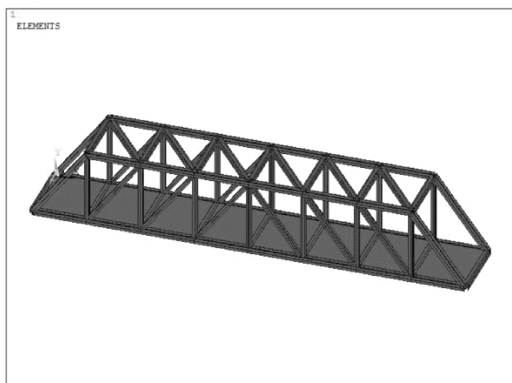


图 18-6　桥体有限元模型

18.1.3 加载及求解

（1）施加约束。

对模型左端 X＝0 处施加全约束；对右端 X＝32 处施加 UY 方向约束。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu＞Select＞Entities 命令，在弹出的对话框中设置拾取对象为 Nodes，拾取方式为 By Location。

通过路径 Main Menu ＞ Solution ＞ Define Loads ＞ Apply ＞ Structural ＞ Displacement ＞ On Nodes，施加约束。

（2）施加重力荷载。

在 GUI 界面中选择 Main Menu ＞ Solution ＞ Define Loads ＞ Apply ＞ Structural ＞ Inertia ＞ Gravity＞Global 命令，在弹出的对话框中设置 ACELY＝10。

（3）施加外荷载。

路径：Main Menu ＞ Solution ＞ Define Loads ＞ Apply ＞ Structural ＞ Force/Moment ＞ On Nodes。

选取跨中两节点 N5、N21，施加沿 Y 方向向下的集中荷载 FY＝－10000。

选取跨中与 N5、N21 相邻的 4 个节点 N4、N6、N20、N22，施加 FY＝－5000。

施加完约束和荷载的模型如图 18-7 所示。

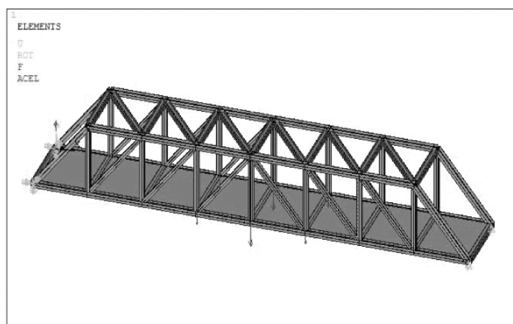


图 18-7　施加完约束和荷载的模型

（4）求解。

路径：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

命令流如下。

```
/SOLU                     !进入求解模块
NSEL,S,LOC,X,0            !选择左端节点
D,ALL,,,,,,ALL,,,,,       !约束所有自由度
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,32           !选择右端节点
D,ALL,,,,,,,UY,,,,        !约束 UY
ALLSEL,ALL
ACEL,0,10,0               !重力荷载
F,4,FY,-5000              !外荷载
F,6,FY,-5000
F,5,FY,-10000
F,20,FY,-5000
F,22,FY,-5000
F,21,FY,-10000
/REPLOT                   !重画图形
ALLSEL,ALL
SOLVE                     !求解
```

18.1.4 一般后处理

求解结束后，进入通用后处理器，进行结果查看与处理。

（1）查看变形趋势。

通过路径 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape，得到结构静载下的变形，如图 18-8 所示。

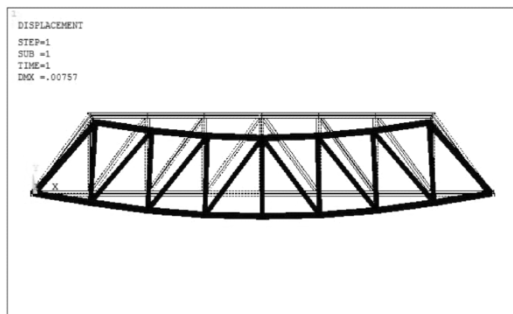


图 18-8　结构变形

由图 18-8 可见，桥桁架最大挠度 0.0072 m，符合使用要求。

（2）查看结构云图。

通过路径 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu，查看节点求解的位移云图。

结构 Y 方向位移云图如图 18-9 所示，X 方向位移云图如图 18-10 所示。

通过路径 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Element Solu，查看单元求解的内力云图。

结构内力云图：FX 分布如图 18-11 所示，FY 云图如图 18-12 所示。

（3）结构的内力及变形等值线图。

通过路径 Utility Menu > PlotCtrls > Device Options，可以查看结构内力及变形的等值线分布图。

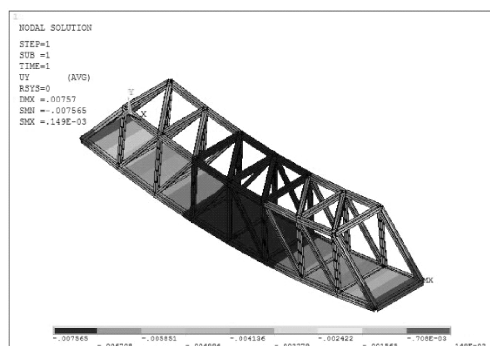


图 18-9　UY 云图

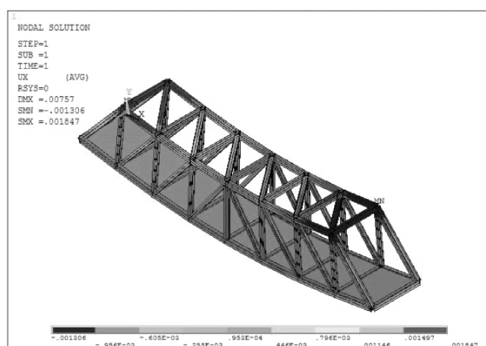


图 18-10　UX 云图

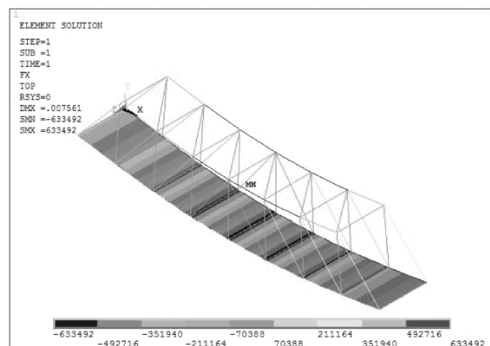


图 18-11　单元 FX 分布

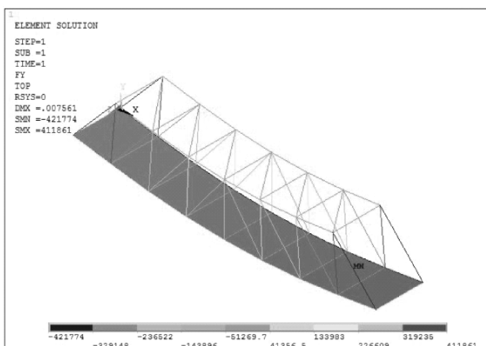


图 18-12　单元 FY 分布

（4）显示轴力。

通过定义单元表，可以绘制结构轴力图。

通过路径 Main Menu > General Postproc > Element Table > Define Table，定义单元表。

通过路径 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Line Elem Res，绘制定义项。

得到结构 Y 方向位移等值线如图 18-13 所示，X 方向位移等值线如图 18-14 所示。

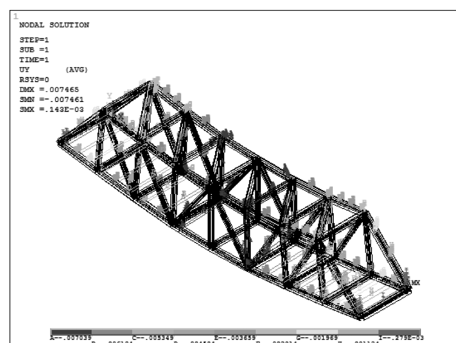


图 18-13　UY 等值线

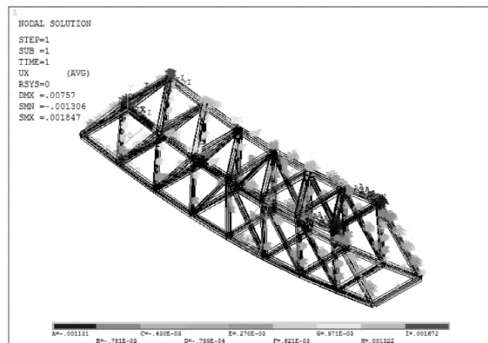
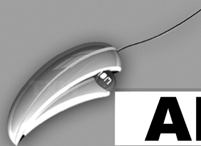


图 18-14　UX 等值线



结构应力等值线如图 18-15 所示，结构轴力图如图 18-16 所示。

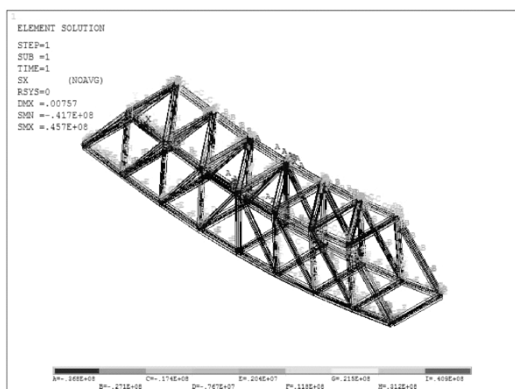


图 18-15 SX 等值线

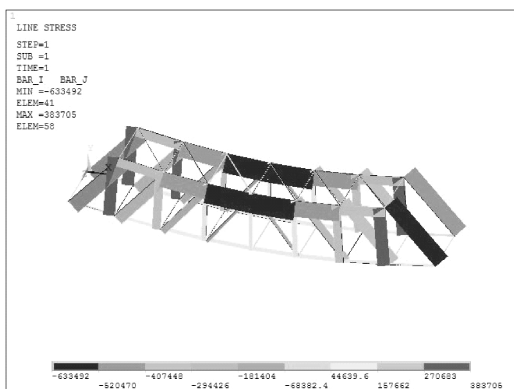


图 18-16 结构轴力图

后处理命令流如下。

```
/POST1                          ！后处理
PLDISP,1
PLNSOL,U,Y,0,1.0                ！显示 Y 方向位移
PLNSOL,U,X,0,1.0                ！显示 X 方向位移
PLESOL,F,X,0,1.0
PLESOL,F,Y,0,1.0
/DEVICE,VECTOR,1
PLNSOL,U,Y,0,1.0                ！显示 Y 方向位移
PLNSOL,U,X,0,1.0                ！显示 X 方向位移
PLESOL,S,X,0,1.0
！－－－－－－－显示线单元轴力－－－－－－－
ETABLE,BAR_I,SMISC,1            ！定义单元表
ETABLE,BAR_J,SMISC,1
PLLS,BAR_I,BAR_J,0.5,1          ！画出轴力图
FINISH
```

18.2 大跨度悬索桥

悬索桥，又称吊桥（Suspension Bridge），指的是以通过索塔悬挂并锚固于两岸（或桥两端）的缆索（或钢链）作为上部结构主要承重构件的桥梁。

悬索桥缆索几何形状由力的平衡条件决定，一般接近抛物线。从缆索垂下许多吊杆，把桥面吊住。在桥面和吊杆之间常设置加劲梁，同缆索形成组合体系，以减小荷载所引起的挠度变形。

18.2.1 悬索桥背景简介

（1）结构特点。

悬索桥是以承受拉力的缆索或链索作为主要承重构件的桥梁，由悬索、索塔、锚碇、吊杆、桥面系等部分组成。

悬索桥的主要承重构件是悬索，它主要承受拉力，一般用抗拉强度高的钢材（钢丝、钢缆等）制作。

由于悬索桥可以充分利用材料的强度，并具有用料省、自重轻的特点，因此在各种结构体系桥梁中的跨越能力最大，跨径可以达到 1000 m 以上。

（2）分类。

按照桥面系的刚度大小，悬索桥可分为柔性悬索桥和刚性悬索桥。

柔性悬索桥的桥面系一般不设加劲梁，因而刚度较小，在车辆荷载作用下，桥面将随悬索形状的改变而产生 S 形的变形，对行车不利；但其构造简单，一般用作临时性桥梁。

刚性悬索桥的桥面用加劲梁加强，刚度较大。加劲梁能同桥梁整体结构承受竖向荷载。

除以上形式外，为增强悬索桥刚度，还可采用双链式悬索桥和斜吊杆式悬索桥等形式，但构造较复杂。

和拱肋相反，悬索的截面只承受拉力。简陋的只供人、畜行走用的悬索桥常把桥面直接铺在悬索上。通行现代交通工具的悬索桥则不行，为了保持桥面具有一定的平直度，是将桥面用吊索挂在悬索上。

与拱桥用刚性的拱肋作为承重结构不同，悬索桥采用的是柔性的悬索作为承重结构。为了避免在车辆驶过时，桥面随着悬索一起变形，现代悬索桥一般均设有刚性梁（又称加劲梁）。桥面铺在刚性梁上，刚性梁吊在悬索上。

现代悬索桥的悬索一般均支承在两个塔柱上，塔顶设有支撑悬索的鞍形支座。承受很大拉力的悬索的端部通过锚碇固定在地基中，也有个别的固定在刚性梁的端部（称之为自锚式悬索桥）。

（3）受力。

悬索桥中最大的力是悬索中的张力和塔架中的压力。由于塔架基本上不受侧向的力，其结构可以做得相当纤细。此外，悬索对塔架还有一定的稳定作用。

假如在计算时忽视悬索的重量，那么悬索形成一个双曲线。这样计算悬索桥的过程就变得非常简单了。

18.2.2 问题简述

本例模拟建立一双索塔悬索桥。

（1）几何参数。

桥全长 400 m，双索塔，自桥面算起塔高 20 m。全桥模型呈对称分布。两塔之间跨度 200 m，左右塔距岸边各 100 m。悬索间距 10 m。几何形状如图 18-17 所示。

（2）单元类型及材料属性。

索塔及桥面各梁采用 BEAM188 单元，拉索及主缆采用 LINK180 单元。



图 18-17 悬索桥几何形状

材料属性：钢索弹性模量为25E10，泊松比为0.1，密度为1000；钢梁弹性模量为30E10，泊松比为0.1，密度为1000。

18.2.3 单元及材料参数

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Environment、Lisence、Working Directory，在 Job Name 框中输入 Suspension Bridge。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。在 GUI 界面中选择 Preferences 命令，在弹出的对话框中选中 Structural。

（2）定义单元类型。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，利用弹出的对话框添加单元 LINK180 为1号单元，添加单元 BEAM188 为2号单元。

（3）定义材料属性。

本例需要定义2种材料，所有的缆索为一种，主塔和桥面梁为一种。

定义材料1。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的对话框中设置弹性模量 EX =2.5E11，泊松比 PRXY =0.10，单击 OK 按钮。在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Density，在弹出的对话框中设定材料密度为1000，单击 OK 按钮完成设置。

通过相同的路径定义材料2，其各项参数为弹性模量 EX =3.0E11，泊松比0.1，密度1000。

（4）定义实常数。

为 LINK180 定义两种实常数。R1 为主缆的截面尺寸，其截面积为1；R2 为拉索的截面，设置为0.02。路径：Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete。

（5）定义截面。

为 BEAM 单元定义截面。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Beam > Common Section 命令，在弹出的对话框中设置截面 ID =1，截面形状为矩形，在面的一系列输入框内依次输入尺寸参数0.5、1。

继续定义 ID =2，矩形截面，依次输入3、2。

命令流如下。

```
FINISH
/CLEAR
/PREP7                                  !进入前处理器
ET,1,LINK180                            !定义单元类型
ET,2,BEAM188
R,1,1,                                  !定义 LINK 单元实常数
R,2,0.02,
SECTYPE,   1,BEAM,RECT,,0               !定义 BEAM 单元截面
SECOFFSET,CENT
SECDATA,0.5,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE,   2,BEAM,RECT,,0
SECOFFSET,CENT
SECDATA,3,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0          !LINK 单元弹性模量
!定义材料参数                            !泊松比
MP,EX,1,25E10                           !密度
```

```
MP,PRXY,1,0.1                    !BEAM 单元弹性模量
MP,DENS,1,1000                   !泊松比
MP,EX,2,30E10                    !密度
MP,PRXY,2,0.1
MP,DENS,2,1000
```

18.2.4 建模

本例建模非常复杂，但各部分之间又有一定的几何规律，因此不适用 GUI 操作，需要使用 APDL 进行。

建模思路：根据模型特点，取 X =0,100 区段的模型，然后通过两次镜像生成全部模型。而区段模型建立的难点在于悬索及主缆的确定。在此通过 APDL 编写函数完成其模型。

主缆弧度曲线为双曲线，给出其函数表达式：

$$Y = A * COSH(X/A) - A$$

式中，$COSH(A) = [e\^{X/A} + e\^{(-X/A)}]/2$；

$A = 250$。

具体操作如下。

（1）生成区段模型。

```
A =250
!生成悬索上端节点
*DO,I,1,10                   !循环语句
  X =10 *(I -1)               !设定悬索上端节点横轴坐标
  Y =A *COSH(X/A) -A          !通过函数表达式确定悬索上端节点 Y 坐标
  N,I,X,Y                     !生成悬索上端节点
*ENDDO                        !结束循环
N,11,100,20                   !生成索塔上端节点
!生成下端节点
*DO,I,1,10                    !循环生成下端节点
  X =10 *I
  Y =0
  N,11 +I,X,Y
*ENDDO                        !结束循环
```

生成悬索上节点如图 18-18 所示，生成下端节点如图 18-19 所示。



图 18-18 上端节点

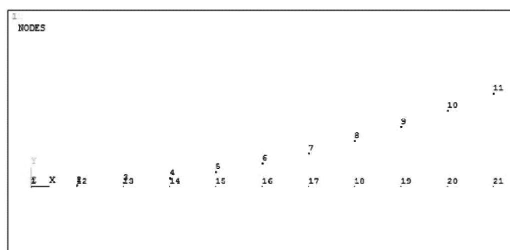
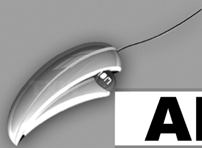


图 18-19 下端节点

设定当前单元类型为 1 号，材料类型 1，截面取实常数 R1，生成主缆模型，如图 18-20 和图 18-21 所示。



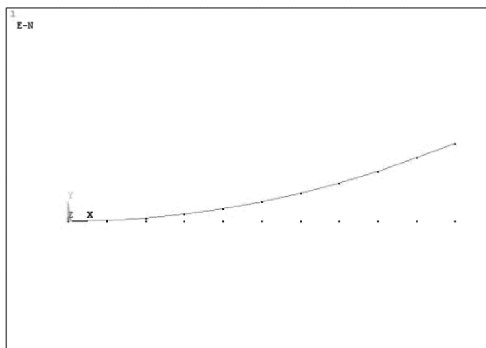


图 18-20 主缆

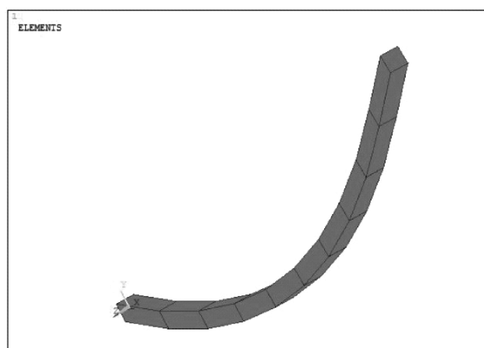


图 18-21 主缆细部

设定单元类型为 1 号，实常数 2，生成悬索，如图 18-22 所示。设置单元类型为 2 号，材料类型 2，截面 1，生成桥面主梁，如图 18-23 所示。

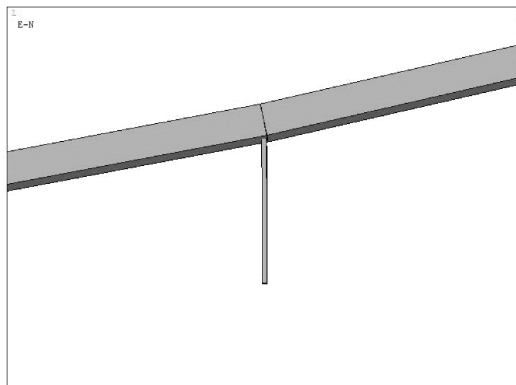


图 18-22 悬索细部

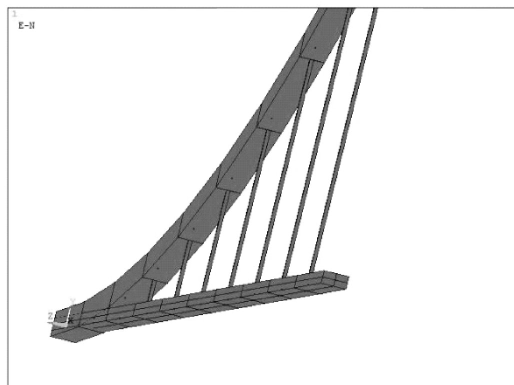


图 18-23 桥面主梁细部

命令流如下。

```
TYPE,1                    !指定单元类型
REAL,1                    !指定实常数
MAT,1                     !指定材料
*DO,I,1,10                !循环生成主缆
  E,I,I+1
*ENDDO
TYPE,1                    !指定悬索的单元及材料
REAL,2
MAT,1
*DO,I,2,10
  E,I,I+10                !循环生成悬索
*ENDDO
TYPE,2                    !指定梁的单元及材料
SECNUM,1                  !指定截面
MAT,2
E,1,12
*DO,I,1,9
  E,I+11,I+12
*ENDDO
```

（2）定义局部坐标系。

通过路径 Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > At Specified Loc，在当前模型的最右端，即 X = 100 处定义局部坐标系。注意，新的坐标系代号必须大于 10。

通过路径 Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Specified Coord Sys，将局部坐标系设为当前坐标系。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Nodes 以及 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Elements > Auto Numbered，以当前局部坐标系的 YZ 面为对称面，镜像生成另一区段模型，效果如图 18-24 所示。

接下来，通过路径 Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Specified Coord Sys 返回到全局笛卡儿坐标（CSYS = 0），再将当前所有模型以 YZ 面为对称面镜像生成另一半模型，效果如图 18-25 所示。

命令流如下。

```
LOCAL,11,0,100                    !定义局部坐标系 11
CSYS,11                           !激活坐标系 11
NSYM,X,21,ALL                     !镜像生成节点
ESYM,,21,ALL                      !镜像生成
NUMMRG,ALL                        !合并重复元素
NUMCMP,ALL                        !压缩编号
CSYS,0                            !回到全局坐标系
NSYM,X,100,ALL                    !镜像生成另一半模型
ESYM,,100,ALL
NUMMRG,ALL
NUMCMP,ALL
```

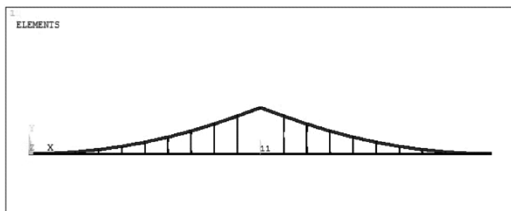


图 18-24　1/2 模型

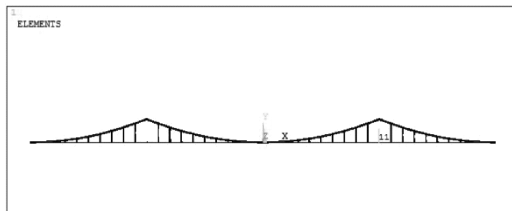


图 18-25　整体模型

再设定当前材料及单元为索塔属性，生成索塔。

命令流如下。

```
TYPE,2                                  !定义单元为 2 号,BEAM 单元
SECNUM,2                                !截面为 2 号
E,50,60                                 !生成左塔
E,11,21                                 !生成右塔
!对以 LINK180 为单元类型的单元设定初应变
ESEL,S,TYPE,,1                          !按单元类型选择单元
INISTATE,SET,DTYP,EPEL                  !定义初始条件为应变
INISTATE,DEFINE,ALL,,,,1E-5,1E-5        !为初应变赋值
CSDELE,11,,1,                           !删除局部坐标系
```

得到索塔如图 18-26 所示，完成建模后如图 18-27 所示。

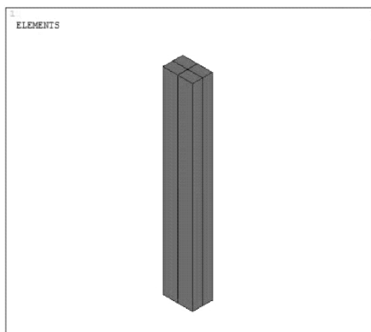


图 18-26 索塔

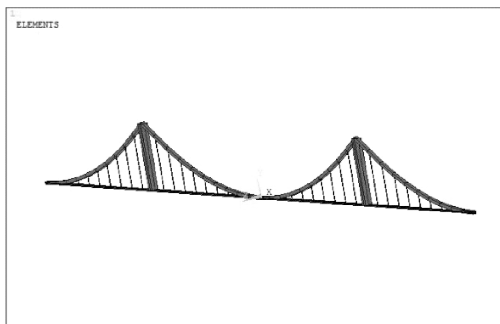


图 18-27 全桥建模完成

18.2.5 找形分析

（1）设定边界条件。

本例中，约束两索塔以及模型左右两端点的 UX、UY 自由度，并约束模型正中对称点的 UX 自由度，然后约束模型的 UZ 自由度。

路径：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes。

（2）施加重力荷载。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Gravity > Global 命令，在弹出的对话框中设置 ACELY = 10。

（3）“杀死”单元。

杀死除主缆以外的其他单元，以便为其找形。

首先要将求解方式 N – R 设置为 Full N – R。路径：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options。

选择单元：在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，在弹出的对话框中设置拾取对象为 Elements，拾取方式选择 By attributes，设置 Real Num = 1，单击 OK 按钮，选中主缆单元。以同样的方法，设置拾取对象为 Elements，拾取方式为 invert，单击 OK 按钮即可。

杀死单元：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Kill Elements。

得到模型约束图，如图 18-28 所示。杀死除主缆以外的单元后的剩余单元如图 18-29 所示。

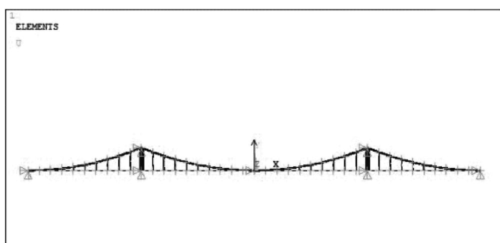


图 18-28 模型约束图

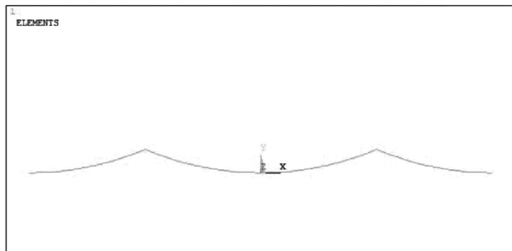


图 18-29 存活单元

（4）设置求解项。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Basic 命令，弹出 Solution Controls 对话框。在 Basic 选项卡中，从 Analysis Options 选项组的下拉列表框中选择 Large Displacement Static；在 Time Control 选项组中，设置 Time at end of loadstep 为 1，Number of substeps、Max no of substeps、Min no of Substeps 分别为 10、20、5；在 Write Items to ResultsFile 选项组中，选中 All solution items 单选按钮，在 Frequency 下拉列表框中选择 Write every substep。

（5）开始第 1 次求解。

路径：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

（6）以向量方式查看结果。

选择存活单元，通过路径 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > User - defined，定义为位移 U，并展示主缆的变形。

本部分命令流如下。

```
/SOLU                          !进入求解模块
NSEL,S,,,1,21,10               !选择节点
NSEL,A,,,22,61,39
NSEL,A,,,50,60,10
D,ALL,UX                       !约束 UX 自由度
NSEL,U,,,1                     !从当前对象中去除节点 1
D,ALL,UY                       !约束 Y 方向自由度
ALLSEL
D,ALL,UZ
ALLSEL
ACEL,,10,,                     !施加重力荷载
NROPT,FULL                     !N - R 分析法设定
ESEL,,REAL,,1                  !选择主缆
ESEL,INVERT                    !反选
EKILL,ALL                      !杀死单元
ALLSEL
NLGEOM,ON                      !打开大变形分析
TIME,1                         !加载时间 1s
NSUBST,10,20,5                 !荷载步设置
OUTRES,ERASE                   !
OUTRES,ALL,ALL                 !
SSTIF,ON                       !
SOLVE                          !求解
FINISH                         !退出求解模块
/POST1                         !进入通用后处理器
ESEL,,LIVE                     !选择存活单元
PLVECT,U                       !显示变形向量
```

得到结果如图 18-30 所示。

（7）找形。

通过 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Update Geom，更新几何形状，完成一次找形。

（8）多次求解。

更新完模型后进入求解模块，再次求解。

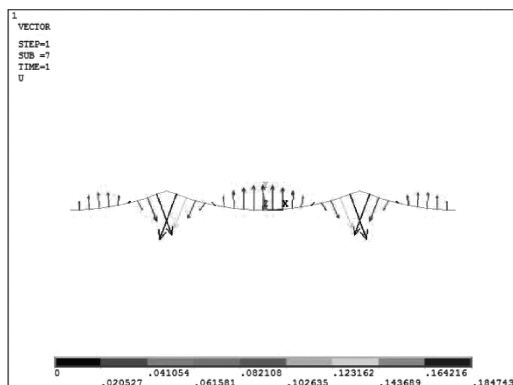


图 18-30 主缆变形矢量图

命令流如下。

```
/PREP7                                              !进入前处理器
UPGEOM,1,LAST,LAST,'SUSPENSION BRIDGE',RST          !更新模型
FINI                                                !退出前处理器
/SOLU                                               !进入求解模块
SOLVE                                               !重新求解
FINI                                                !退出求解模块
/POST1                                              !进入后处理器再次查看矢量图
ESEL,,LIVE
PLVECT,U
ALLSEL
FINI                                                !退出后处理器
SAVE                                                !保存结果
```

第 2 次求解后，得到的矢量图如图 18-31 所示。

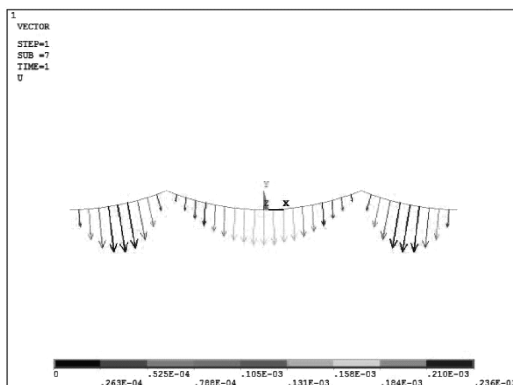


图 18-31 第 2 次求解后的矢量图

18.2.6 施工过程模拟

由中间梁段开始架设，对中点施加梁自重荷载 FY = -50000，相邻部位则为 FY = -25000。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol n Controls > Basic，在弹出的对话框中设定 Time at end of loadstep 为 2，单击 OK 按钮开始求解。

命令流如下。

```
/SOLU
F,1,FY,-50000
F,2,FY,-25000
F,41,FY,-25000
TIME,2
SOLVE
/POST1
ESEL,,LIVE
PLVECT,U
ALLSEL
```

得到结果如图 18-32 所示。

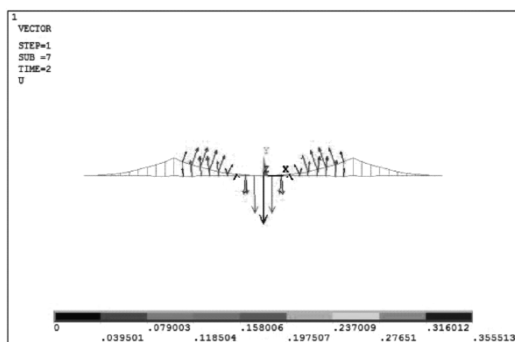


图 18-32 施工中间段加劲梁后

接下来通过循环语句生成其他各段梁。

```
/SOLU                        !进入求解模块
DOFSEL,S,,FY                 !定义荷载累计
FCUM,ADD,1
DOFSEL,ALL
*DO,I,1,18                   !循环语句
XX0=I*10
XX=(I+1)*10
NSEL,,LOC,X,-XX0
NSEL,R,LOC,Y,0.1,30
NSEL,A,LOC,X,XX0
NSEL,R,LOC,Y,0.1,30
F,ALL,FY,-25000
ALLSEL
NSEL,,LOC,X,XX
NSEL,R,LOC,Y,0.1,30
NSEL,A,LOC,X,-XX
NSEL,R,LOC,Y,0.1,30
F,ALL,FY,-25000
ALLSEL
TIME,I+2                     !每一步加载时间 1 s
SOLVE                        !求解
*ENDDO                       !结束循环
/POST26                      !进入时间历程后处理器
NSOL,2,1,U,Y,UY_2            !查看跨中挠度变化
XVAR,1
```

```
PLVAR,2,
/POST1                              ! 进入后处理器查看位移矢量
SET,LIST
SET,2,7                             ! 读入第 2 步第 7 子步数据
PLDISP,1                            ! 绘制变形图
ESEL,,LIVE
PLVECT,U                            ! 绘制矢量图
ALLSEL
SAVE                                ! 存储计算结果
```

通过时间历程后处理，得到施工步的跨中挠度时间历程曲线，如图 18-33 所示。

由图 18-33 可知，在时间为 4 s 时挠度最大。通过路径 Main Menu > General Postproc > Results Summary，得到时间步信息如图 18-34 所示，得到第 2 荷载步第 7 子步为挠度最大步。

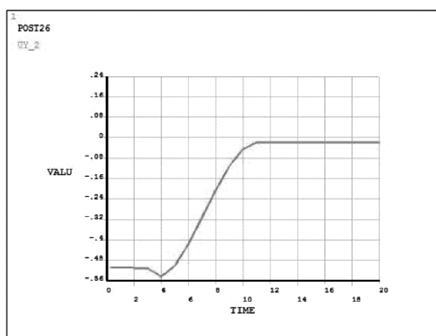


图 18-33　跨中挠度时间历程曲线

```
SET,LIST Command
File

 *****  INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE  *****

  SET   TIME/FREQ    LOAD STEP   SUBSTEP  CUMULATIVE
    1 0.50000E-01        1          1          1
    2 0.10000            1          2          2
    3 0.15000            2          1          3
    4 0.20000            2          2          4
    5 0.25000            3          1          5
    6 0.30000            3          2          6
    7 0.35000            4          1          7
    8 0.40000            4          2          8
    9 0.45000            5          1          9
   10 0.50000            5          2         10
   11 0.55000            6          1         11
   12 0.60000            6          2         12
   13 0.65000            7          1         13
   14 0.70000            7          2         14
```

图 18-34　SET，LIST Command 窗口

通过路径 Main Menu > General Postproc > Read Results > By Set number，得到第 2 步第 7 子步数据。最后得到其最大位移矢量图如图 18-35 所示，最大位移变形图如图 18-36 所示。

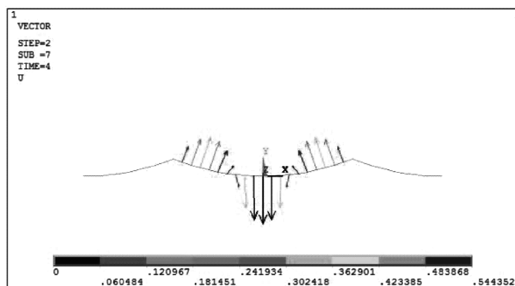


图 18-35　最大位移矢量

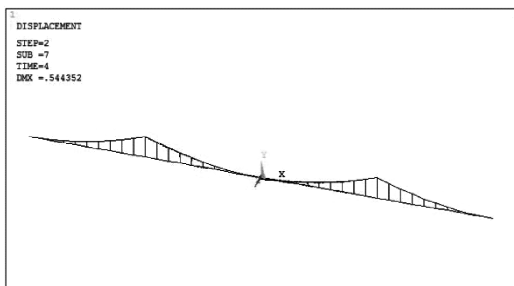


图 18-36　最大位移变形图

由计算结果，得到其位移最大值为 0.544352 m。

18.2.7 悬索桥全结构静力分析

施工完成后，对整座桥进行受力分析。

（1）删除所有集中力。

路径：Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Force/Moment > On Nodes。

命令流如下。

```
/SOLU
NSEL,,LOC,Y,0.1,30
NSEL,A,NODE,,1
FDELE,ALL,FY
ALLSEL
```

（2）激活其余单元。

路径：

- Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Activate Elem。
- Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Activate Elem。

命令流如下。

```
ALLSEL
ESEL,U,LIVE
EALIVE,ALL                    !激活单元
ALLSEL
```

（3）设置并求解。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Basic 命令，在弹出的对话框中设定 Time at end of load step 为 12。

再通过路径 Main Menu > Solution > Solve > Current LS 进行求解。

命令流如下。

```
TIME,12
SOLVE
```

（4）结果分析。

后处理命令流如下。

```
/POST1                              !后处理
ESEL,,LIVE
PLVECT,U                            !绘制位移矢量
ALLSEL
PLDISP,1                            !变形图
PLNSOL,U,Y,0,1.0                    !变形云图
ETABLE,BAR_I,SMISC,1
ETABLE,BAR_J,SMISC,1
PLLS,BAR_I,BAR_J,0.5,1              !画出轴力图
FINISH
SAVE                                !保存
```

得到变形矢量如图 18-37 所示，最终位移如图 18-38 所示。

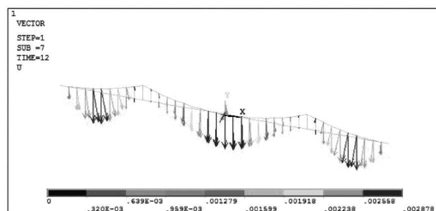


图 18-37　最终变形矢量

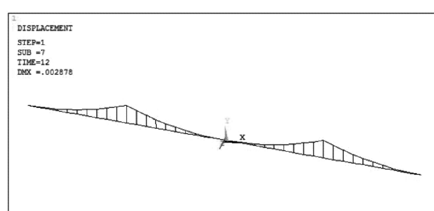


图 18-38　最终位移

由计算结果得到其最大位移为0.002878，发生在跨中。

变形云图如图18-39所示，主缆轴力图如图18-40所示。

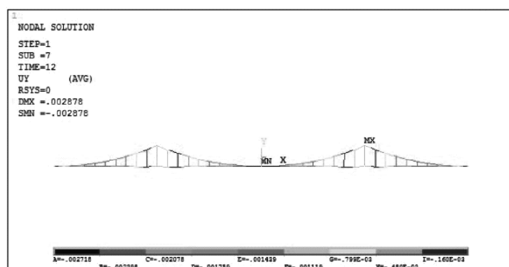


图18-39　变形云图

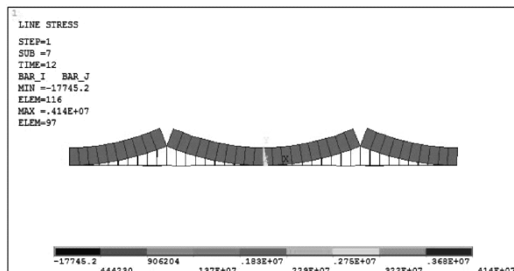


图18-40　主揽轴力图

18.2.8 悬索桥的地震动力响应

跨度大的桥梁，其动力响应分析显得格外重要。现在就竖向地震加速度下的桥梁动力响应进行分析。

（1）生成地震波加速度文件。

预先将地震波文件放入工作目录下，通过以下命令将其导入加速度文件以备调用。

```
*DIM,AAY1,ARRAY,2,50                      !定义地震波向量维度
*CREATE,ANSUITMP                          !生成input文件
*VREAD,AAY1(1,1),ACELY,TXT,,50            !读入地震波文本文件
(E9.3,E11.3)
*END
/INPUT,ANSUITMP                           !导入定义完成的input文件
```

（2）设置求解项并导入地震波加速度。

命令流如下。

```
/SOLU                    !进入求解器
ANTYPE,TRANS             !定义为瞬态分析
*DO,I,1,50
TIME,I*0.1               !时间步长
AUTO,OFF                 !
DELTIM,0.05              !
KBC,0                    !
OUTRES,BASIC             !
ACEL,,-AAY1(2,I),        !导入地震加速度
SOLVE                    !求解
*ENDDO
```

（3）查看计算结果

通过时间历程后处理器查看各分析项的时间历程曲线。

```
/POST26                            !进入时间历程后处理器
/XRANGE,0,5.5                      !设定坐标范围
!显示位移
/AXLAB,Y,U                         !定义Y轴显示名称
NSOL,2,1,U,Y,UY_2                  !定义变量2为Y向位移
```

```
PLVAR,2                    !绘制变量 2 时程曲线
!显示支反力
/AXLAB,Y,RF                !重新为 Y 轴命名
RFORCE,3,21,F,X,FX_3       !定义支反力为变量 3,4
RFORCE,4,21,F,Y,FY_4
PLVAR,3                    !绘制变量 3,4
PLVAR,4                    !
FINISH
```

得到跨中位移时程曲线如图 18-41 所示，主塔支反力时程曲线 RFX 如图 18-42 所示。

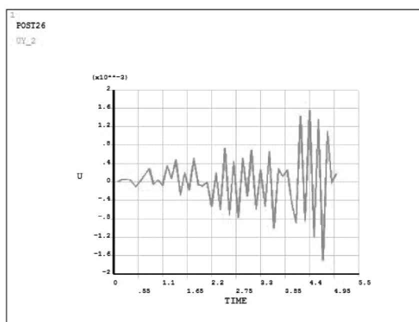


图 18-41　跨中位移时程曲线

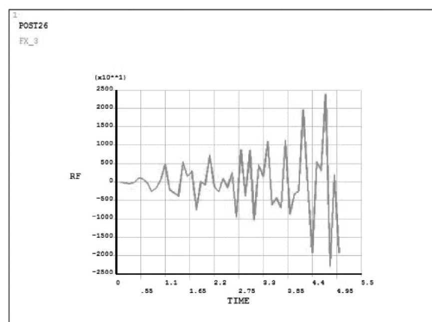


图 18-42　主塔支反力时程曲线 RFX

主塔支反力时程曲线 RFY 如图 18-43 所示。

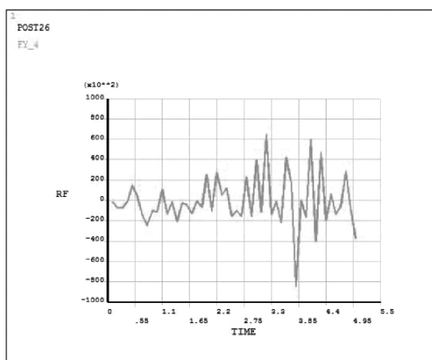


图 18-43　主塔支反力时程曲线 RFY

18.3　本章小结

本章主要学习了桥梁工程相关问题的建模及分析方法。

首先对钢桁架桥进行了建模及静力分析。其中有关于通过节点生成桥面板单元的应用，读者应该掌握其方法。

其次对大跨度悬索桥进行了建模及分析。通过对模型的单元生死设置，以及自重分析，完成了主索的找形分析；然后进一步进行了施工的模拟以及外荷载静力分析和地震动力响应分析。

桥梁工程的形式多样，读者应熟练掌握并理解本章所述复杂建模的方法和结构分析的思路，在实际应用中才能结合不同的工程情况合理建模、分析。

第19章　隧道工程实例分析

与桥梁工程类似，隧道工程是土木工程中与交通直接相关的另一种重要工程形式。随着经济的发展，快捷、便利的交通越来越受到重视，而山岭隧道、地下铁路隧道等，真正将阻碍变为通路。本章将对这些工程进行仿真分析。

本章学习目标

- 学习隧道的建模方法
- 掌握山体隧道的开挖模拟及生死单元法
- 掌握地铁站台的建模方法及地震荷载加载方法

19.1　山体隧道开挖

隧道是埋置于地层内的一种地下建筑物。隧道大部分的功能是供行人、脚踏车（自行车）、一般道路交通、机动车、铁路交通或运河使用，而部分隧道只运送水、石油，或用于其他特定服务，包括军事及商业物流等。

19.1.1 隧道开挖问题

隧道可分为山岭隧道、水底隧道和地下隧道等。

隧道的结构包括主体建筑物和附属设备两部分。主体建筑物由洞身和洞门组成；附属设备包括避车洞和防排水设施，长、大隧道还有专门的通风和照明设备。

建造隧道的方法多种多样。按开挖断面形式不同，分为全断面法和分部开挖法。深度浅的隧道可先开挖后覆盖，称为明挖回填式隧道；先兴建从地表通往地下施工区的竖井，再直接从地下持续开挖称为钻挖式隧道；建造海底隧道可用沉管式隧道。

19.1.2 问题简述

如图19-1所示为某山岭公路隧道，使用ANASYS对其开挖过程进行模拟及各进度时刻的受力状态分析。

（1）几何尺寸。

洞高6.7 m，最大宽度3.11 m。整个模型去宽54.9 m，高48.15 m，深50 m的隧道及周围岩土。其模型正立面示意图如图19-2所示，隧道示意图如图19-3所示。



图 19-1　某公路隧道

（2）单元及材料属性。

本例拟采用由面拉伸成体的建模方式，因此在建立面模型时使用 MESH200 单元。

隧道壁采用 SHELL181 单元，弹性模量为 3E10，泊松比为 0.2，材料密度为 2500。

岩石采用 SOLID185 单元，弹性模量为 4.5E8，泊松比为 0.32，密度为 2700。

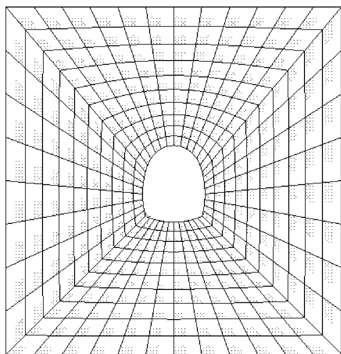


图 19-2　隧道立面模型示意图

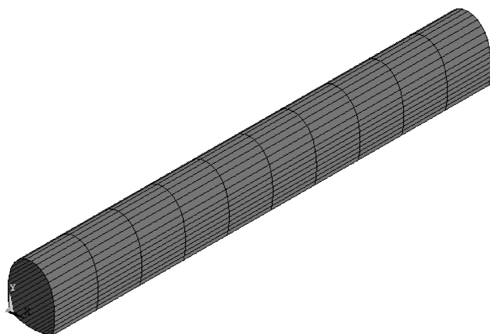


图 19-3　隧道示意图

19.1.3 前处理

（1）运行启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Environment、Lisence、Working Directory，在 Job Name（项目名称）框中输入 Tunnel Excavation。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preferences 命令，在弹出的对话框中选中 Sructural。

（2）定义单元类型。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，利用弹出的 Library of Element Types 对话框添加非求解单元 not solved > mesh facet 200 为 1 号单元。

回到 Element Types 对话框，选中 MESH200，单击 Options 按钮，在弹出的对话框中设置其 K1 为 3D LINE 2 NODE。

以同样的方法再添加另一 MESH200 为 2 号单元，在单元类型选项对话框中设置其 K1 为 QUAD 4 NODE。

添加单元 SHELL181 为 3 号单元，添加 SOLID185 为 4 号单元，最后单击 OK 按钮退出。

（3）定义材料属性。

本例需要定义 3 种材料：隧道壁为混凝土材料、周边岩体材料，以及隧道内挖去的岩石材料。

设定混凝土弹性参数。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的对话框中设置 EX 为 3E10，PRXY 为 0.2，单击 OK 按钮。

在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Density，在弹出的对话框中设置材料密度为 2500，单击 OK 按钮。

为岩体定义材料参数：EX 为 4.5E8，PRXY 为 0.32，密度为 2700。

挖除的岩石材料：EX 为 4.51E8，PRXY 为 0.32，密度为 2700。

（4）定义实常数。

为应用板壳单元的混凝土壁设置厚度。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete，添加厚度 R,1,0.4。

上述步骤相应的命令流如下。

```
FINISH
/CLEAR
/PREP7                          !进入前处理器
ET,1,MESH200,2                  !用于 3-D 的 2 节点线
ET,2,MESH200,6                  !用于 3-D 的 4 节点四边形
ET,3,SHELL181                   !用于混凝土壁的壳单元
ET,4,SOLID185                   !岩石
R,1,0.4                         !壳的厚度
MP,EX,1,3.0E10                  !壳的材料,C30 混凝土
MP,PRXY,1,0.2
MP,DENS,1,2500
MP,EX,2,4.5E8                   !保留岩石的材料
MP,PRXY,2,0.32
MP,DENS,2,2700
MP,EX,3,4.51E8                  !挖去岩石的材料
MP,PRXY,3,0.32
MP,DENS,3,2700
```

（5）建模。

在此采用由底向上建模方式。先生成关键点，路径为 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS。

再经过点生成弧线，路径为 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Arcs > Through 3 KPs。

通过关键点生成面，路径为 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs。

至此生成隧道部分的面。

再通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By 2 Corners，生成周边的岩体面模型。

命令流如下。

```
K,,0,0                              !生成关键点
K,,0,3.85
K,,0.88,5.5
K,,2.45,6.15
K,,4.02,5.5
K,,4.9,3.85
K,,4.9,0
LARC,1,2,6,8.13                     !定义两点之间的圆弧线
LARC,2,3,6,3.21
LARC,3,4,6,2.22
LARC,4,5,2,2.22
LARC,5,6,2,3.21
LARC,6,7,2,8.13
LARC,7,1,4,6
A,1,2,3,4,5,6,7                     !产生面1
BLC4,-12,-12,28.9,30.15             !产生面2
BLC4,-25,-12,13,30.15               !产生面3
BLC4,16.9,-12,13,30.15              !产生面4
BLC4,-25,-30,54.9,18                !产生面5
/PNUM,AREA,1
AOVL,1,2,3,4,5                      !布尔操作重叠,得到面3
NUMMRG,ALL,,,,LOW
NUMCMP,ALL
```

得到隧道几何模型如图19-4所示，全部平面模型如图19-5所示。

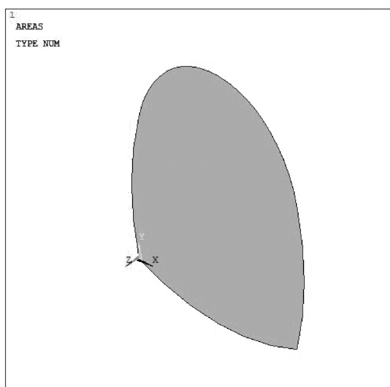


图19-4　隧道面

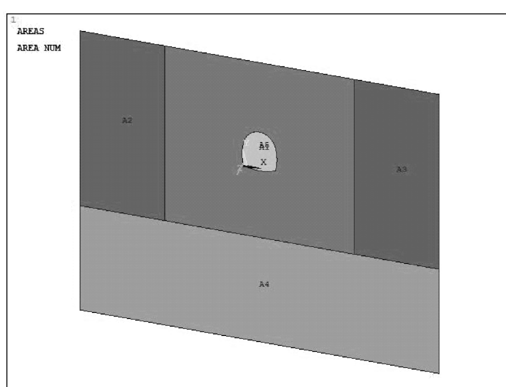


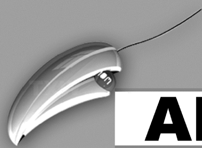
图19-5　全部平面模型

接下来，为现有的几何平面划分网格，并最终拉伸成体。

其中隧道口周边岩体，即面5有洞口（见图19-6），不方便划分，因此需要进行面的分割。从洞口4个角点向4个方向分出4条直线，如图19-7所示。

再利用直线进行面的切割，路径为Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Area by Line。切割后的模型如图19-8所示。

通过路径Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > Concatenate > Lines将洞顶4段弧线连接成一条弧线。通过各边线进行网格尺寸控制，路径为Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > Picked Lines。为待划分的各面赋予相应的属性，路径为Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas。



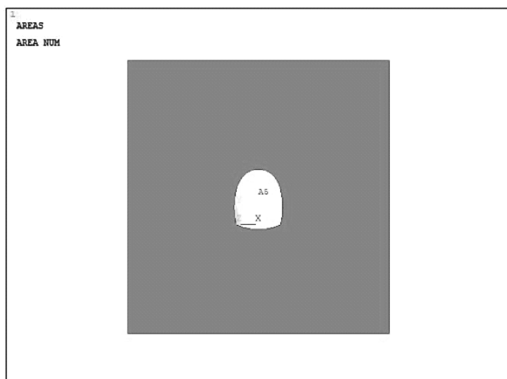


图 19-6 带洞口的面 5

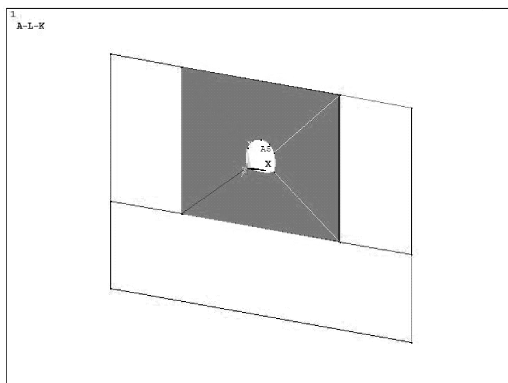


图 19-7 辅助切割直线

具体操作见命令流。

```
L,1,8                          !从 4 个角点上连接出 4 条线
L,7,9
L,6,10
L,2,11
LSEL,S,LINE,,21,22,1           !用线分割面
LSEL,A,LINE,,7
ASBL,5,ALL                     !切分命令
LSEL,S,LINE,,21,24,3
LSEL,A,LINE,,1
ASBL,7,ALL
LSEL,S,LINE,,22,23,1
LSEL,A,LINE,,6
ASBL,8,ALL
NUMMRG,ALL,,,,LOW              !对重合的各元素及编号进行合并处理
NUMCMP,ALL
LSEL,S,LINE,,2,5,1             !选择分段的弧线
LCCAT,ALL                      !进行线的连接
LESIZE,ALL,,,3                 !设定直线划分份数
LSEL,S,LINE,,9,11,2
LSEL,A,LINE,,6
LSEL,A,LINE,,1
LESIZE,ALL,,,8
LSEL,S,LINE,,8,10,2
LSEL,A,LINE,,7
LESIZE,ALL,,,12
LSEL,S,LINE,,21,24,1
LESIZE,ALL,,,10,2
!对面进行划分
TYPE,2                         !为待划分的面设定单元类型
ASEL,S,AREA,,5,8,1             !选择面 5 ~ 8
AMESH,ALL                      !划分面
ASEL,S,AREA,,1
AMESH,1
LSEL,S,LINE,,12,13,1           !通过直线控制划分份数
LESIZE,ALL,,,8
LSEL,S,LINE,,15,18,1
LESIZE,ALL,,,6,2
```

```
ASEL,S,AREA,,2,3,1
AMESH,ALL
LSEL,S,LINE,,14
LESIZE,ALL,,,24
LSEL,S,LINE,,19,20,1
LESIZE,ALL,,,6,2
LSEL,S,LINE,,15,17,2
LSEL,A,LINE,,8
LCCAT,ALL                                    !连接直线
ASEL,S,AREA,,4
AMESH,ALL
LSEL,S,LCCA                                  !选择通过连接生成的直线
LDELE,ALL                                    !删除直线
NUMMRG,ALL,,,,LOW
NUMCMP,ALL
ALLSEL
```

至此得到平面模型，如图 19-9 所示。

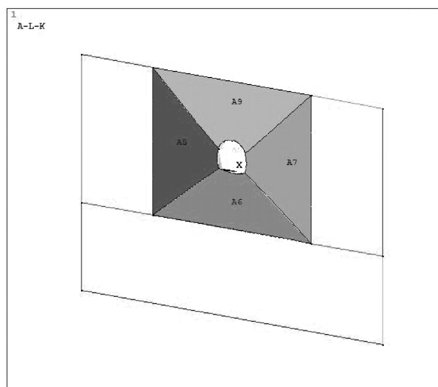


图 19-8 切分后的面

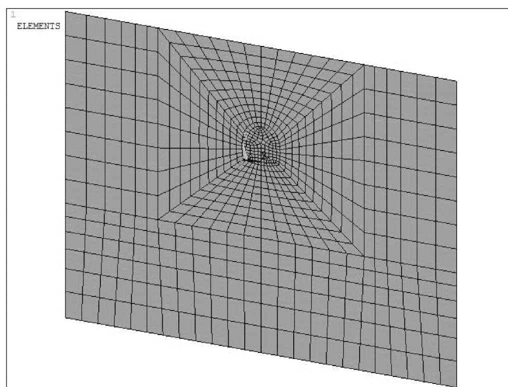


图 19-9 划分网格

接下来，将已划分好的平面模型拉伸为立体模型。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Elem Ext Opts，设置拉伸方向的网格数为 10。

通过路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Lines > Along Lines，选择隧道壁弧线，将其拉伸为沿洞深的隧道护壁面。再为其设定单元类型为 SHELL181，划分网格。

其他岩体部分的拉伸方法类似，只是均由面拉伸成体，并且直接赋予单元类型及材料属性。

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Lines。

命令流如下。

```
!首先拉伸成壳单元                          !定位辅助点
K,1000,,,-50
L,1,1000
/VIEW,1,1,1,1
/REPLOT
EXTOPT,ESIZE,10,0,                         !设置拉伸的单元份数
```

```
LSEL,S,LINE,,1,7,1                  !选择洞壁线
ADRAG,ALL,,,,,,25                   !拉伸
GPLOT
TYPE,3                              !设置单元类型
REAL,1                              !实常数
MAT,1                               !材料种类
ASEL,S,LOC,Z,-25                    !选择隧道壁
APLOT
LSEL,S,LOC,Z,-25                    !
LESIZE,ALL,,,10                     !设置划分份数
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,ALL                           !划分洞壁单元
!拉伸岩石的实体
ASEL,INVERT                         !反选当前面
APLOT                               !得到岩体面
EXTOPT,ESIZE,10,0,                  !设置拉伸属性
EXTOPT,ACLEAR,1
TYPE,4
MAT,2
ASEL,R,AREA,,2,8,1
VDRAG,ALL,,,,,,25                   !拉伸
ALLSEL
!挖去部分岩石的实体
MAT,3
VDRAG,1,,,,,,25
EPLOT
NUMMRG,ALL,,,,LOW
NUMCMP,ALL
```

得到的岩壁模型如图 19-10 所示，拉伸后的有限元模型如图 19-11 所示。

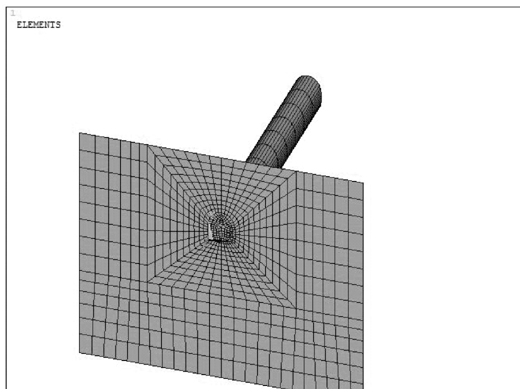


图 19-10　岩壁模型

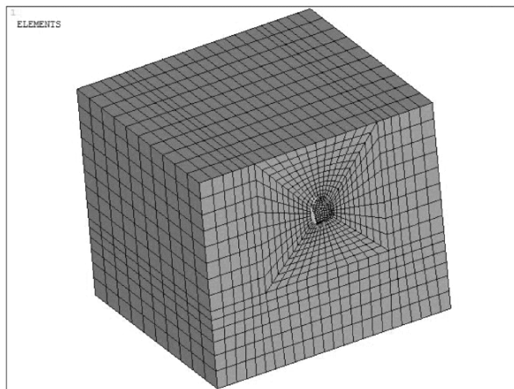


图 19-11　有限元模型

19.1.4 求解选项及边界条件设置

（1）设置求解选项。

通过路径 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis，设置分析类型为 Static。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Basic，弹出 Solution Controls 对话框。在 Basic 选项卡中，从 Analysis Options 下拉列表框中选择 Large Dis-

placement Static（大变形分析），在 Automatic time stepping 下拉列表框中选择 Prog Chosen，设置时间增量为0.1，最大时间步长0.2，最小时间步长则为0.05。

通过路径 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Nonlinear，打开线性搜索与时间步长预测器。

通过路径 Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options，设置 N－R 分析方法为 FULL N－R。

通过路径 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Convergence Crit，设置收敛条件为 F,0.02。

（2）施加约束。

通过路径 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas，约束两侧面 X 方向的自由度，约束地面 Y 方向的自由度，约束模型前后两面 Z 方向的自由度。

（3）施加重力。

通过路径 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Gravity > Global，对模型施加重力，ACELY 中输入 10。

约束后的模型如图 19-12 所示。

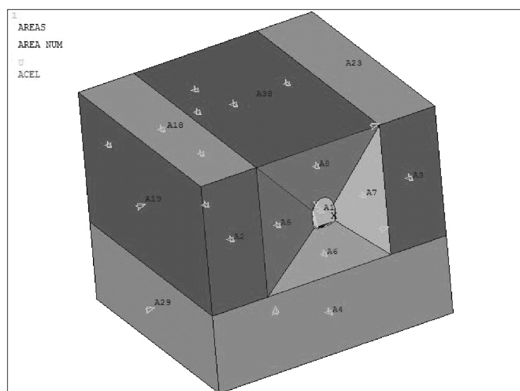


图 19-12　施加约束和重力的模型

本段命令流如下。

```
/SOLU                              ！进入求解模块
ANTYPE,STATIC                      ！分析类型为静力分析
DELTIM,0.1,0.05,0.2                ！时间步长设置
AUTOTS,ON                          ！使用自动时间步
PRED,ON                            ！打开时间步长预测器
LNSRCH,ON                          ！打开线性搜索
NLGEOM,ON                          ！打开大位移效果
NROPT,FULL                         ！设定牛顿－拉普森选项
CNVTOL,F,,0.02,2,0.5               ！定义收敛准则
！约束两侧面的 X 方向的约束
ASEL,S,LOC,X,-25                   ！选择两侧面
ASEL,A,LOC,X,-25+54.9
DA,ALL,UX,0                        ！约束 UX
ALLS
！约束地面的 Y 方向的约束
```

```
ASEL,S,LOC,Y,-30                    !选择底面
DA,ALL,UY,0                         !约束 UY
ALLS
!约束前后面 Z 方向的约束
ASEL,S,LOC,Z,-50                    !选择前后两面
ASEL,A,LOC,Z,0
DA,ALL,UZ,0                         !约束 UZ
ALLSEL
ACEL,,10                            !施加重力
FINI
```

19.1.5 基于单元生死的开挖过程求解

首先，要确定模型中各部分的生死过程。在施工前，要明确，所有的混凝土壁是不存在的，而所有的岩体都是存在的，所以要先“杀死”所有壳单元部分，并将死单元的节点全部约束。然后求解，得到开挖前的初始状态。

选择单元：Utility Menu > Select > Entities。

单元生/死路径：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Kill Elements。

约束节点：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes。

求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

命令流如下：

```
ESEL,S,TYPE,,3                      !选择壳单元
EKILL,ALL                           !杀死壳单元
ESEL,ALL
ESEL,S,LIVE                         !选择活的单元
NSLE,S                              !选择活单元上的节点
NSEL,INVERT                         !反向选择,即选择死单元上的节点
D,ALL,ALL,0                         !将死单元上的节点约束所有位移
NSEL,ALL
ESEL,ALL
/PBC,ALL,,1                         !显示边界条件
GPLOT
SOLVE                               !求解
```

初步计算结果下的变形如图 19-13 所示，应力分布如图 19-14 所示。

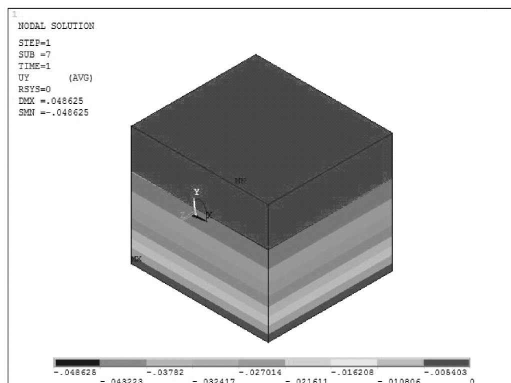


图 19-13 竖向位移云图

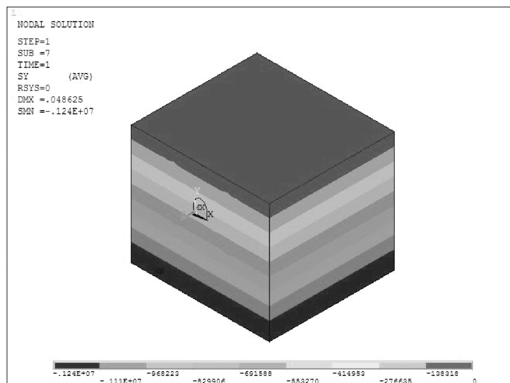


图 19-14 竖向应力云图

接下来进行正式的开挖过程。开挖过程的每一步，都要杀死一部分洞内岩石单元。路径：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Kill Elements。

随后，激活相应部分的壳单元。路径：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Activate Elem。然后通过 Utility Menu > Select > Entities，选择当前活着的所有单元，反选得到杀死了的单元。这时需要在求解前将死单元上的所有节点再次全部约束起来。

之后就可以开始求解了。每一步开挖都遵循此过程，总共分 5 段开挖，每段挖 10 m。

第 1 步开挖：

```
/SOLU
ESEL,S,MAT,,3                          !选择挖去的岩石,杀死
NSLE,S
NSEL,R,LOC,Z,0.1,-10.1
ESLN,R,1
EKILL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
NSLE,S
NSEL,R,LOC,Z,0.1,-10.1
ESLN,R,1
EALIVE,ALL                             !激活挖去的岩石对应的壳单元
NSLE,S
DDELE,ALL,ALL                          !并将其节点上的约束删除
ESEL,ALL
ESEL,S,LIVE                            !选择活单元
NSLE,S
NSEL,INVERT                            !反向选择
D,ALL,ALL,0                            !将死单元上的节点约束所有自由度
NSEL,ALL
ESEL,ALL
SOLVE                                  !求解
FINI                                   !退出求解器
/POST1                                 !进入通用后处理器
SET,LAST                               !选择最后一步
ESEL,S,LIVE                            !选择活单元
ESEL,R,TYPE,,3                         !选择活单元中的3单元
PLNSOL,U,Y,0,1                         !绘制Y位移
PLNSOL,S,Y,0,1                         !绘制Y应力
FINI
```

得到第 1 步开挖的隧道计算结果，第 1 步开挖 UY 云图如图 19-15 所示，第 1 步开挖 SY 云图如图 19-16 所示。

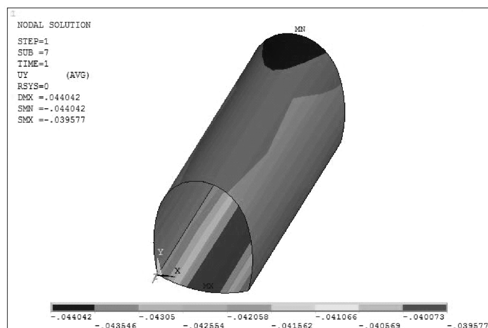


图 19-15　第 1 步开挖 UY 云图

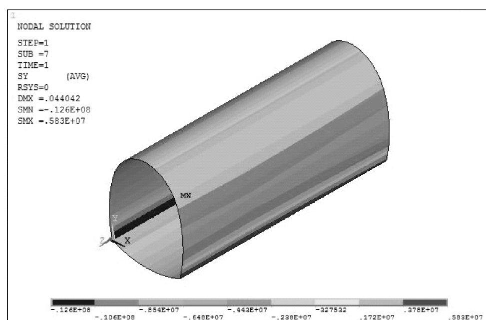
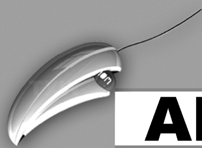


图 19-16　第 1 步开挖 SY 云图



接下来进行第 2 步的开挖，命令流如下。

```
/SOLU
ESEL,S,MAT,,3                      !选择挖去的岩石,杀死
NSLE,S
NSEL,R,LOC,Z,0.1 -10, -20.1
ESLN,R,1
EKILL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3                     !激活挖去的岩石对应的壳单元
NSLE,S                             !并将其节点上的约束删除
NSEL,R,LOC,Z,0.1 -10, -20.1
ESLN,R,1
EALIVE,ALL
NSLE,S
DDELE,ALL,ALL
ESEL,ALL
ESEL,S,LIVE                        !选择活单元
NSLE,S
NSEL,INVERT                        !反向选择
D,ALL,ALL,0                        !将死单元上的节点约束所有自由度
NSEL,ALL
ESEL,ALL
SOLVE
FINI
/POST1
SET,LAST
ESEL,S,LIVE
ESEL,R,TYPE,,3
PLNSOL,U,Y,0,1
PLNSOL,S,Y,0,1
FINI
```

得到第 2 步开挖后的隧道计算结果，第 2 步开挖 UY 云图如图 19-17 所示，第 2 步开挖 MISES 应力如图 19-18 所示。

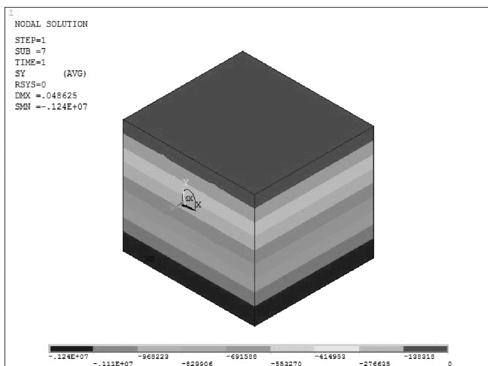


图 19-17 第 2 步开挖 UY 云图

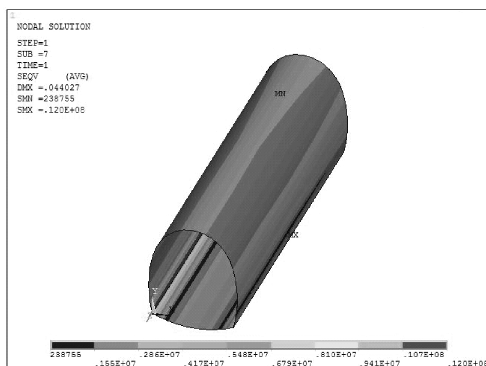


图 19-18 第 2 步开挖 MISES 应力

第 3 ~5 步开挖过程相似。第 5 步开挖命令流如下。

```
/SOLU
ESEL,S,MAT,,3
NSLE,S                                 !选择挖去的岩石,杀死
NSEL,R,LOC,Z,0.1 -40, -50.1
```

```
ESLN,R,1
EKILL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
NSLE,S
NSEL,R,LOC,Z,0.1 -40, -50.1
ESLN,R,1
EALIVE,ALL                              !激活挖去的岩石对应的壳单元
NSLE,S
DDELE,ALL,ALL                           !并将其节点上的约束删除
ESEL,ALL
ESEL,S,LIVE
NSLE,S
NSEL,INVERT                             !反向选择
D,ALL,ALL,0                             !将死单元上的节点约束所有自由度
NSEL,ALL
ESEL,ALL
SOLVE
FINI
/POST1
SET,LAST
ESEL,S,LIVE
ESEL,R,TYPE,,3
PLNSOL,U,Y,0,1
PLNSOL,S,EQV,0,1.0                      !VON MISES 应力
FINI
```

得到第 5 步开挖后的隧道计算结果，第 5 步开挖 UY 云图如图 19-19 所示，第 5 步开挖 MISES 应力如图 19-20 所示。

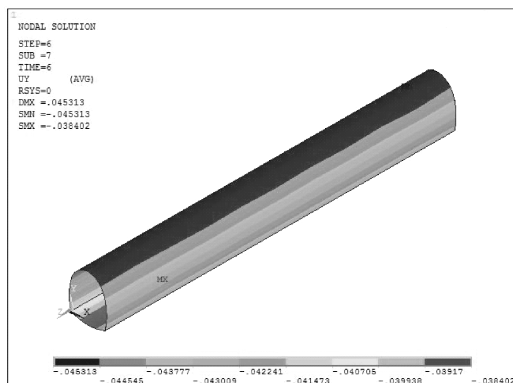


图 19-19　第 5 步开挖 UY 云图

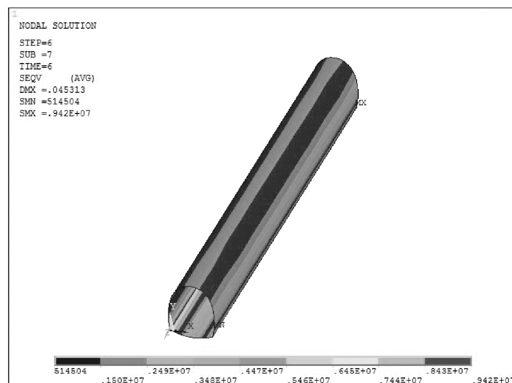


图 19-20　第 5 步开挖 MISES 应力

用户也可通过 APDL 的循环语句功能，完成开挖过程。命令流如下。

```
*DO,II,1,5,1                            !开始 5 次循环
    ESEL,S,MAT,,3                       !选择要挖去的岩石单元
    NSLE,S                              !选择岩石单元上的节点
    NSEL,R,LOC,Z,0.1-(II-1)*10,         !选择第 II 步要开挖的部分
-(10.1+(II-1)*10)                       !杀死单元
    ESLN,R,1                            !依节点选择单元
    EKILL,ALL                           !选择挖去的岩石对应的壳单元
    ESEL,S,TYPE,,3
```

```
    NSLE,S
    NSEL,R,LOC,Z,0.1 - (II - 1) * 10,
 - (10.1 + (II - 1) * 10)                    !激活挖去的岩石对应的壳单元
    ESLN,R,1
    EALIVE,ALL                               !将激活的单元上的节点约束删除
    NSLE,S
    DDELE,ALL,ALL                            !选择活单元
    ESEL,ALL
    ESEL,S,LIVE                              !反向选择
    NSLE,S                                   !将死单元上的节点约束所有自由度
NSEL,INVERT
D,ALL,ALL,0
    NSEL,ALL                                 !求解
    ESEL,ALL                                 !结束
SOLVE
 * ENDDO
```

19.1.6 后处理

挖空后的模型如图 19-21 所示。

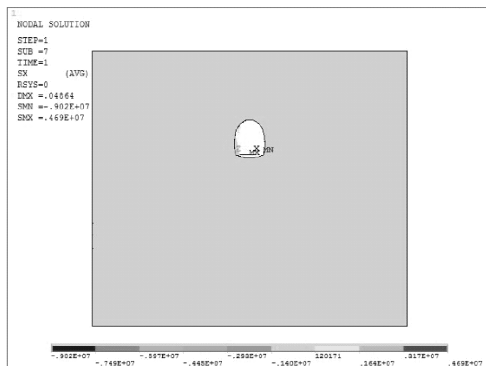


图 19-21　挖空后模型

本例主要分析对象为隧道，因此先选中应用 SHELL181 单元的所有单元。在 GUI 界面中选择 Utility Menu > Select > Entities 命令，在弹出的对话框中设置拾取对象为 Elements，拾取方式为 By Attributes，选中 Elem type num 单选按钮，在输入框中输入 3。通过路径 Utility Menu > PlotCtrls > Device Options，打开等值线图的绘制功能。

通过路径 Main Menu > General Postproc > Read Results > By Pick 选择要读取的数据，通过路径 Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 绘制结果图。

命令流如下。

```
/post1                        !进入通用后处理器
/DEVICE,VECTOR,1              !打开等值线
ESEL,S,type,,3                !选择壳单元
SET,2,LAST,1,                 !读入 SET2 数据
PLNSOL,U,Y,0,1                !绘制 Y 方向变形
PLNSOL,S,EQV,0,               !绘制 MISES 应力
!第 2 步开挖                    !以下注释类似
```

```
SET,3,LAST,1,
PLNSOL,U,Y,0,1
PLNSOL,S,EQV,0,
!第 3 步开挖
SET,4,LAST,1,
PLNSOL,U,Y,0,1
PLNSOL,S,EQV,0,
!第 4 步开挖
SET,5,LAST,1,
PLNSOL,U,Y,0,1
PLNSOL,S,EQV,0,
!第 5 步开挖
SET,6,LAST,1,
PLNSOL,U,Y,0,1
PLNSOL,S,EQV,0,
```

得到各开挖步的变形情况，第一步开挖 UY 等值线如图 19-22 所示，应力等值线如图 19-23所示。

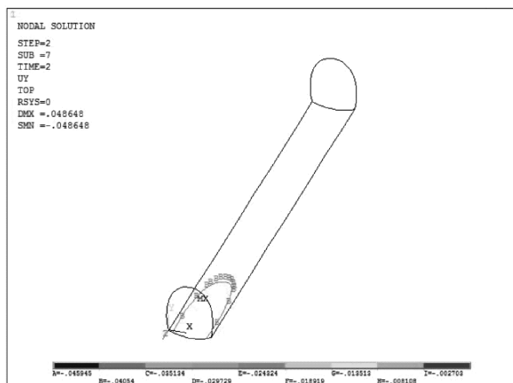


图 19-22　第 1 步开挖 UY 等值线

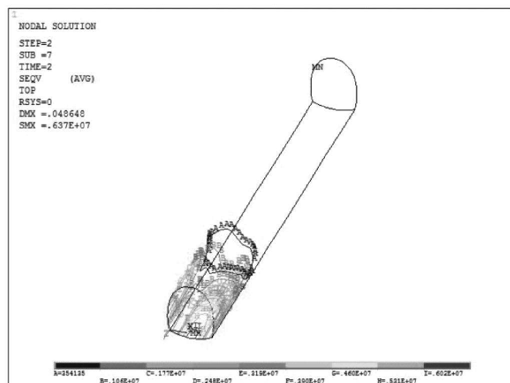


图 19-23　第 1 步开挖应力等值线

第 2 步开挖 UY 等值线如图 19-24 所示，第 2 步开挖应力等值线如图 19-25 所示。

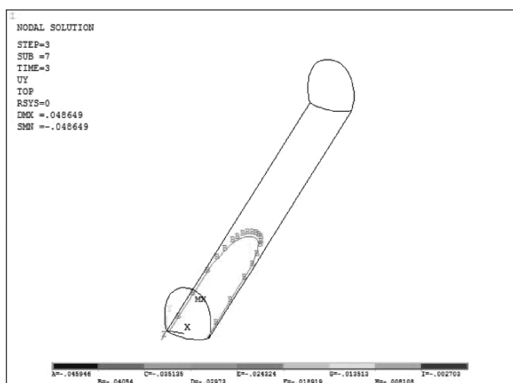


图 19-24　第 2 步开挖 UY 等值线

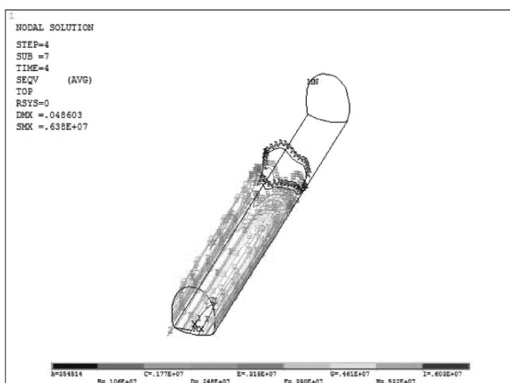


图 19-25　第 2 步开挖应力等值线

第 3 步开挖 UY 等值线如图 19-26 所示，第 3 步开挖应力等值线如图 19-27 所示。

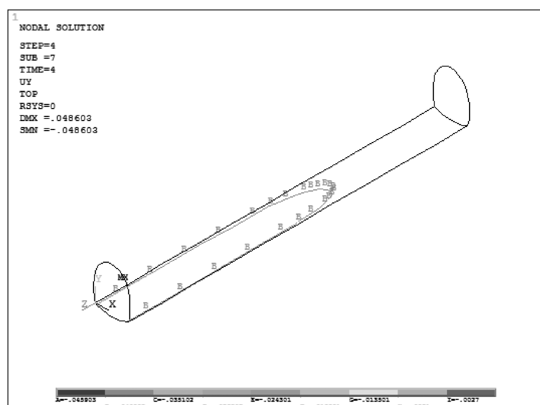


图 19-26　第三步开挖 UY 等值线

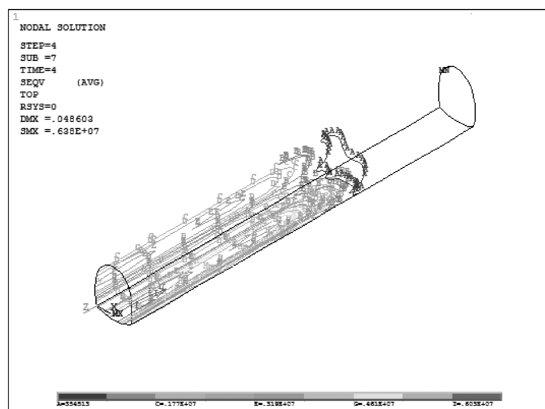


图 19-27　第三步开挖应力等值线

第 4 步开挖 UY 等值线如图 19-28 所示，第 4 步开挖应力等值线如图 19-29 所示。

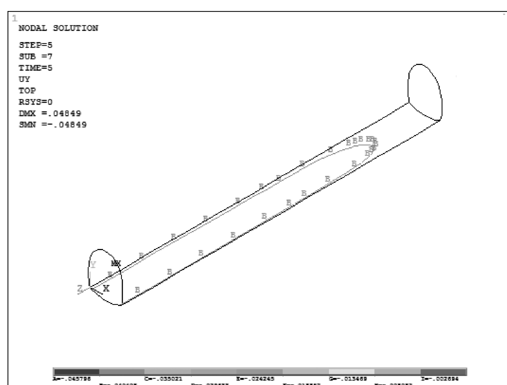


图 19-28　第 4 步开挖 UY 等值线

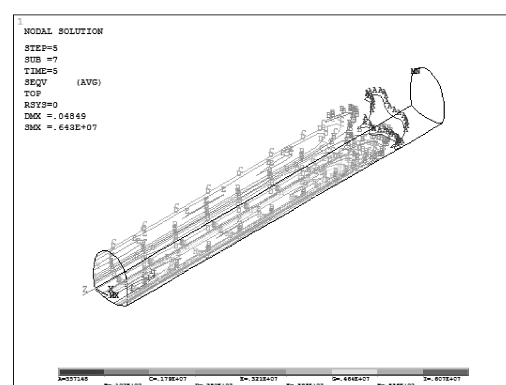


图 19-29　第 4 步开挖应力等值线

第 5 步开挖 UY 等值线如图 19-30 所示，第 5 步开挖应力等值线如图 19-31 所示。

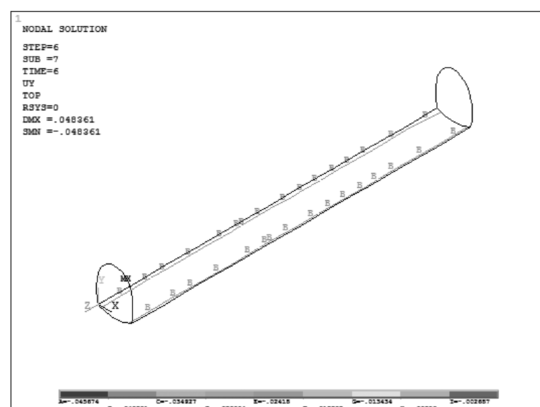


图 19-30　第 5 步开挖 UY 等值线

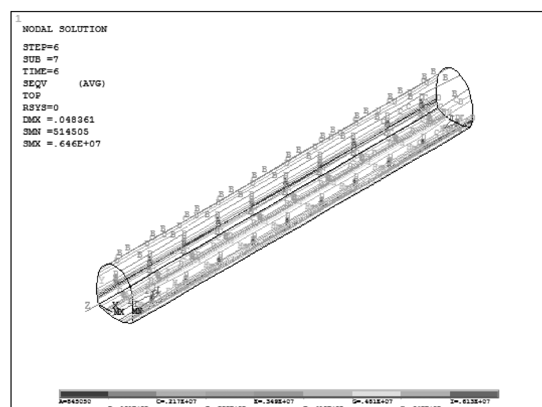


图 19-31　第 5 步开挖应力等值线

至此开挖模拟完成。

19.2 地铁站台的地震响应分析

随着城市建设的不断发展，真规模日益扩大，地面空间和交通问题严重影响了城市的进步发展。在此背景下，建立地下交通体系已成为解决城市空间问题的一个十分有效的途径。

与城市中其他交通工具相比，地铁具有节省土地、大量节省通勤时间、减少噪声、减少与其他运输系统间的干扰、节约能源、减少污染等优点，因此得到了普遍应用。在世界上大多数经济发达地区大城市的客运交通中，地铁发挥着不可替代的作用，被当作城市交通的骨干，用以解决交通堵塞问题。

19.2.1 相关知识

（1）地铁抗震重要性。

地铁的广泛应用使得其安全性显得尤为重要。近年来的地震灾害表明，地下结构在强地震作用下可能会出现严重的震害及次生灾害，城市大型地下工程的抗震安全性已成为备受关注的社会问题之一。

客观地讲，地下结构由于受到地层的约束，加之城市隧道大多采用抗震性能较好的整体现浇钢筋混凝土结构及能够适应地层变形的装配式圆形结构，震害明显低于地上结构。但这并不意味着地下结构在地震时是安全的，历史上多次大地震中都曾出现较大震害。

（2）地下结构抗震分析方法。

地下结构抗震分析方法主要有等效静力法、反应位移法和平面有限元动力计算方法。地铁规范给出的抗震设计方法为等效静力法。等效静力法大致与地面结构抗震设计的方法类似，没有考虑土与结构间的相互作用，主要用于结构形式较为简单、重要程度不高，或仅需粗略估算地震荷载的情况。考虑了土与结构间的相互作用的方法，典型的有反应位移法和有限元动力计算方法。本节以某地铁站台为例，输入修正的埃尔森特罗地震波，进行平面有限元动力计算分析。

相对于等效静力法和反应位移法，有限元动力计算方法能较为详细地反映周围地层的动力特性，从而使抗震计算更加精确。

19.2.2 问题简述

（1）模型尺寸。

本例参考某地震振动台实验 1:10 模型建立有限元模型。

模型尺寸为2261 mm × 656 mm × 442 mm，中柱横断面尺寸为26 mm × 26 mm，顶板、中楼板和底板厚度分别为 27 mm、14 mm、30 mm，侧壁厚度为 20 mm，柱间距为 266 mm。振动台实验中的地铁车站模型如图 19-32 所示。

（2）单元类型及材料属性。

车站选择 SHELL181 单元，中柱选择 BEAM188 单元，土体选择 SOLID65 单元。

站台混凝土材料属性：弹性模量为 3E10，泊松比为 0.2，密度为 2500。

土体材料属性：弹性模量为 15.3E6，泊松比为 0.36，密度为 1910。黏聚力为61E3，摩

擦角为 19.5。

（3）地震波。

对模型施加 EI－Centro 波水平加速度，其时程曲线如图 19-33 所示。


图 19-32 振动台实验模型

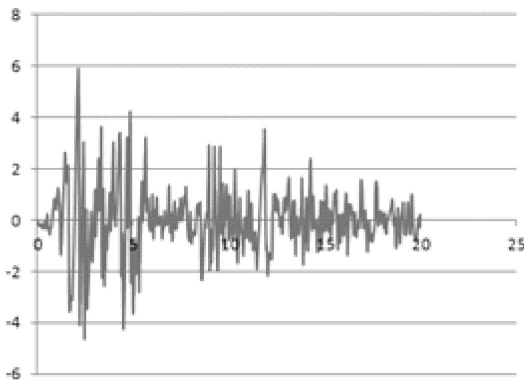


图 19-33 EI－Centro 波形

其中横轴为时间 s，纵轴为加速度 m/s^2。

（4）鉴于本例建模复杂，需要调用文件且借助于循环语句，因此采用命令流方式进行分析。

19.2.3 前处理

（1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 17.0，在弹出的 17.0：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口中分别设置 Simulation Environment、Lisence、Working Directory，在 Job Name 框中输入 Tunnel1。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preferences 命令，在弹出的对话框中选中 Sructural。

（2）定义单元类型。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，利用弹出的对话框添加单元 SOLID65 为 1 号单元，添加单元 SHELL181 为 2 号单元。添加单元 BEAM188 为 3 号单元。

（3）定义材料属性。

本例需要定义 2 种材料，车站为混凝土材料，周边土体为采用 DP 模型的材料。

定义混凝土材料属性。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。在 Material Models Available > Structural > Linear > Elastic > Isotropic，在弹出的对话框中设置 EX 为 30E9，PRXY 为 0.2，单击 OK 按钮。在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Density，在弹出的对话框中设定材料密度为 2500，单击 OK 按钮完成设置。

定义土体材料属性。以同样的方法设置 EX 为 15.3E6，PRXY 为 0.36，密度为 1910。在 Material Models Available 列表框中选择 Structural > Nonlinear > Inelastic > Non－metal Plastic > Drucker－Prager，在弹出的对话框中分别设置 Cohesion = 61E3，Fric Angle = 19.5，单击 OK 按钮，完成 DP 参数的设置。

（4）定义实常数。

为应用板壳单元的各梁板构件设置厚度。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete，添加顶板厚度 R,1,0.027、中楼板的板厚 R,2,0.014、底板厚度 R,3,0.030、侧壁厚度 R,4,0.020。

（5）定义截面。

为隧道中柱设定矩形柱截面。通过路径 Main Menu > Preprocessor > Sections > Beam > Common Section，设定截面形状为矩形，B = H = 0.026。

命令流如下。

```
FINISH
/CLEAR
/PREP7                                  !进入前处理器
!定义单元类型
ET,1,SOLID65
ET,2,SHELL181
ET,3,BEAM188
!定义实常数
R,1,0.027                               !顶板厚度
R,2,0.014                               !中楼板的板厚
R,3,0.030                               !底板厚度
R,4,0.020                               !侧壁厚度
SECTYPE,   1,BEAM,RECT,,0               !定义截面
SECOFFSET,CENT
SECDATA,0.026,0.026,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0                                 !地铁车站材料特性
MP,EX,1,3E10
MP,NUXY,1,0.2
MP,DENS,1,2500                          !土体的材料特性
MP,EX,2,15.3E6
MP,NUXY,2,0.36
MP,DENS,2,1910
TB,DP,2,,,
TBDATA,2,61E3, 19.5,
```

（6）建立几何模型。

建模采用 APDL。首先根据车站各部分尺寸，预设变量值，这样在定义关键点位置时就可以直接使用计算式。命令流如下。

```
AA =0.656                               !地铁车站模型的宽
BB =0.442                               !地铁车站模型的高
CC =0.014                               !中楼板的板厚
DD =0.020                               !侧壁厚度
EE =0.026                               !中柱横截面长,宽
FF =0.266                               !柱间距
GG =0.027                               !顶板厚度
HH =0.030                               !底板厚度
LL =2.261                               !车站模型的长
MM =0.3325                              !最外中柱距车站端面的距离
KK =2.5                                 !土的宽
NN =1.2                                 !土的高
!地铁车站
K,1,(AA/2-DD/2),(BB/2-GG/2),,           !生成关键点
```

```
K,2,-(AA/2-DD/2),(BB/2-GG/2),,
K,3,-(AA/2-DD/2),-(BB/2-GG/2),,
K,4,(AA/2-DD/2),-(BB/2-GG/2),,
K,5,(AA/2-DD/2)
K,6,-(AA/2-DD/2)                      !生成直线
L,1,2
L,2,3
L,3,4
L,4,1
L,6,5
K,7,AA,,,
K,8,AA,,-LL,
L,7,8
ADRAG,1,2,3,4,,,6                     !拖拽直线生成面
ADRAG,5,,,,,,6
LDELE,6,,,1
AGLUE,1,2,3,4,5                       !黏结 5 个面
NUMCMP,ALL
K,13,0,0,-MM
K,14,0,(BB/2-GG/2),-MM
L,13,14
LGEN,7,21,,,,,-FF
LGEN,2,21,27,1,,-(BB/2-GG/2),
!建立土模型
K,1801,(AA/2-DD/2)                    !注释同上
K,1802,KK/2
K,1803,KK/2,NN/2
K,1804,(AA/2-DD/2),NN/2
K,1805,,NN/2
K,1806,,(BB/2-GG/2)
K,1807,,(BB/2-GG/2),-LL
K,1808,(AA/2-DD/2),(BB/2-GG/2)
L,1804,1801
L,1801,1802
L,1802,1803
L,1803,1804
L,1805,1804
L,1804,1808
L,1808,1806
L,1806,1805
L,1806,1807
AL,35,38,37,36                        !线围成面
AL,39,40,41,42
ASEL,S,,,8,9,1
CM,AA2,AREA
VDRAG,AA2,,,,,,43                     !拖拽成体
VSEL,S,,,1,2,1
CM,VV1,VOLU
VSYMM,X,VV1                           !镜像生成体
VSEL,S,,,1,4,1
CM,VV2,VOLU
VSYMM,Y,VV2
ALLSEL,ALL
AOVLAP,ALL
VGLUE,ALL                             !黏结
NUMMRG,KP                             !合并重复点
NUMCMP,ALL                            !压缩编号
```

得到地铁站几何模型如图 19-34 所示，地基模型如图 19-35 所示。

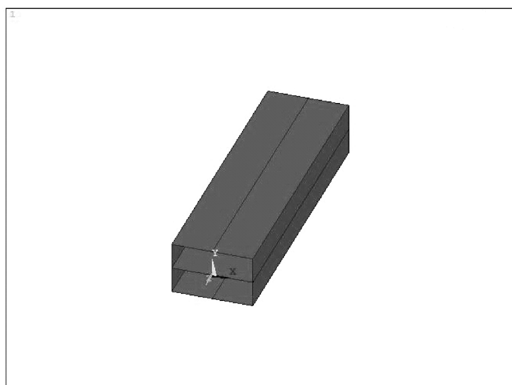


图 19-34　车站几何模型

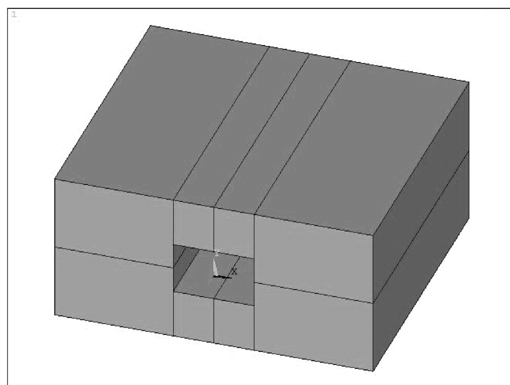


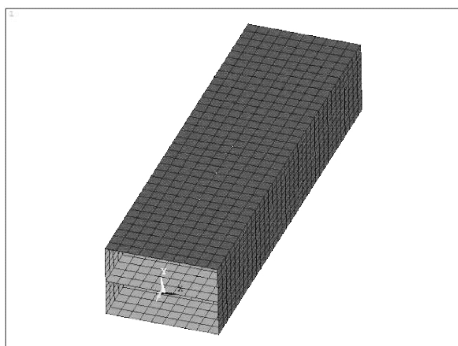
图 19-35　地基及隧道模型

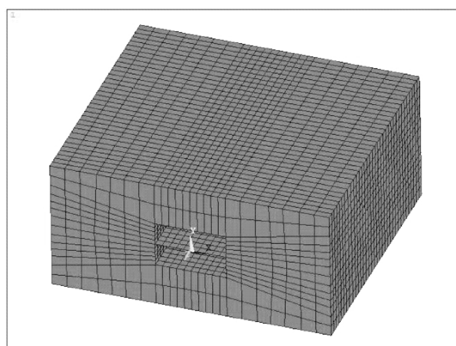
（7）划分网格。

```
！划分梁单元
LSEL,S,,,21,34,1              ！选择梁单元直线
CM,LL1,LINE                   ！生成线集合
LATT,1,,3,,,,1                ！赋属性
LESIZE,LL1,,,5                ！控制单元划分尺寸
LMESH,ALL                     ！划分梁单元
！划分壳单元
LSEL,ALL                      ！顶板
LSEL,S,,,6,7,1                ！
LSEL,A,,,42
CM,LL2,LINE                   ！生成线集合
LESIZE,LL2,0.0665             ！控制单元划分尺寸
LSEL,ALL
LSEL,S,,,1,2,1
LSEL,A,,,40,52,12
CM,LL3,LINE
LESIZE,LL3,,,5
ASEL,ALL                      ！选择顶板面
ASEL,S,,,2,14,12
CM,AAA1,AREA
AATT,1,1,2                    ！赋予顶面属性
AMESH,AAA1                    ！划分顶板
！中楼板
LSEL,ALL
LSEL,S,,,12,13,1
CM,LL4,LINE
LESIZE,LL4,0.0665
LSEL,ALL
LSEL,S,,,3,11,8
CM,LL5,LINE
LESIZE,LL5,,,10
ASEL,ALL
ASEL,S,,,3
AATT,1,2,2
AMESH,3
```

```
!底板
LSEL,ALL
LSEL,S,,,5,9,4
LSEL,A,,,74,76,2
CM,LL6,LINE
LESIZE,LL6,,,5
LSEL,ALL
LSEL,S,,,8,10,2
LSEL,A,,,75
CM,LL7,LINE
LESIZE,LL7,0.0665
ASEL,ALL
ASEL,S,,,24,30,6
CM,AAA2,AREA
AATT,1,3,2                    !
AMESH,AAA2                    !
!侧板
LSEL,ALL
LSEL,S,,,14,20,2
LSEL,A,,,15,19,2
LSEL,A,,,4
CM,LL8,LINE
LESIZE,LL8,,,5
ASEL,ALL
ASEL,S,,,4,7,1
CM,AAA3,AREA
AATT,1,4,2
AMESH,AAA3
!划分体单元                    !打开智能划分
ALLSEL,ALL                    !选择体
SMRT,1
VSEL,S,,,1,8,1                !赋属性
CM,VV3,VOLU                   !扫掠网格
VATT,2,,1
VSWEEP,VV3
NUMMRG,ALL
NUMCMP,ALL
FINISH
```

最后生成地铁站台有限元模型如图 19-36 所示，整体模型如图 19-37 所示。


图 19-36　站台有限元模型


图 19-37　整体模型

站台细部构造如图 19-38 所示，站台柱如图 19-39 所示。

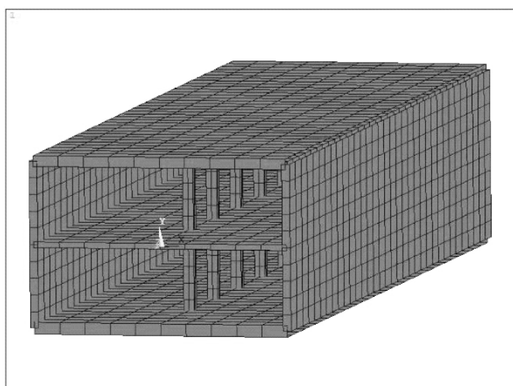


图 19-38　按单元形状显示的站台

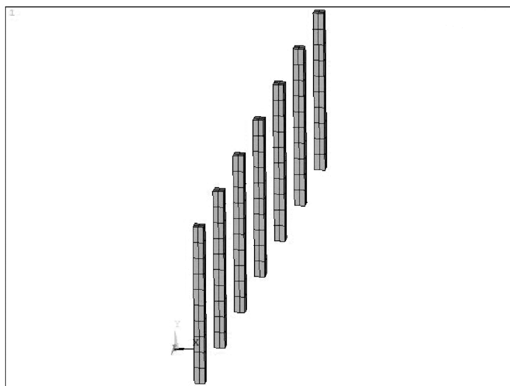


图 19-39　按单元形式显示的柱

19.2.4 加载及求解

（1）施加约束及重力荷载。

通过路径 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Gravity > Global 施加重力 ACELY = 9.8。

通过路径 Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas，拾取模型底面，施加 UY = 0 约束；拾取两侧面，施加 UX = 0 约束；拾取前后两立面，施加 UZ = 0 约束。

具体命令流如下。

```
/SOLU                          !进入求解模块
NSEL,ALL                       !选择所有节点
ACEL,0,9.8,0,                  !施加重力加速度
ASEL,S,,,21,22                 !选择底面
ASEL,A,,,28,35,7
DA,ALL,UY,                     !约束 Y 方向自由度
ASEL,S,,,10,18,8               !选择侧面
ASEL,A,,,31,34,3
DA,ALL,UX,                     !约束 X 方向自由度
ASEL,S,,,1,8,7                 !选择地铁站台附近前后面
ASEL,A,,,16,26,10
ASEL,A,,,27,33,6
ASEL,A,,,36,45,9
DA,ALL,UZ,                     !约束 Z 方向自由度
FINISH                         !退出求解模块
```

完成约束后，得到模型如图 19-40 所示。

（2）读入加速度时程。

读入加速度时程前，要先将地震波时程文件（参见配书光盘）放到指定文件夹中，以便调用。存放位置可在调用时自行设定，无特别规定。调入命令如下。

```
ALLSEL
*DIM,SHUIPING,ARRAY,2,1000                         !定义数据矩阵
*CREATE,ANSUITMP                                    !生成文件
*VREAD,SHUIPING(1,1),SHUIPING,TXT,                  !读入时程文件
E:\ANSYS 17.0\EXAMPLE\C12\C12.1,1000,
(E9.3,E11.3)                                        !读入完毕
*END                                                !输入数据
/INPUT,ANSUITMP
```

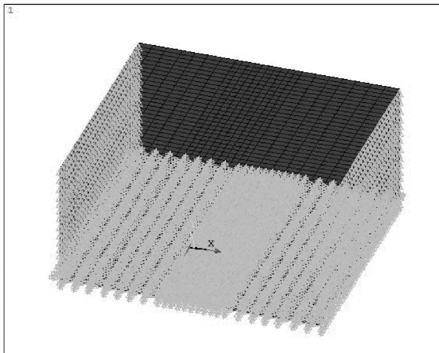


图 19-40　施加约束后的模型

（3）设置求解选项。

在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis 命令，在弹出的对话框中设置分析类型为 Transient。在 GUI 界面中选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Transient 命令，在弹出的对话框中设定 Full Transient Options 为 Stepped loading。

调入地震波加速度时程文件，以文件内数据为每一步的加速度，荷载的时间间隔为 0.02 秒，共 50 步。循环加载方式采用 APDL 的循环语句。具体命令流如下。

```
/SOLU                        !进入求解模块
ANTYPE,4                     !分析类型为 Transient
TRNOPT,FULL                  !设定分析项
LUMPM,0
*DO,T,1,50,1                 !循环读入地震波加速度时程文件数据
TIME,0.02*T                  !每一步间隔 0.02
KBC,1                        !荷载设置
NSUB,1                       !子步数 1
ACEL,SHUIPING(2,T)           !读入加速度
ALPHAD,0.069                 !质量矩阵
BETAD,0.035                  !刚度
SOLVE                        !求解
*ENDDO                       !结束循环
FINISH
```

求解结束。

19.2.5 一般后处理

进入通用后处理器，查看地铁站的状态。

```
/POST1                        !进入通用后处理器
SET,LAST                      !最后一步数据
PLNSOL,U,SUM                  !整体变形
ESEL,S,TYPE,,2                !拾取车站部分
PLNSOL,U,X                    !变形云图
PLNSOL,U,Y
PLNSOL,U,Z
PLNSOL,S,X,0,1                !应力云图
PLNSOL,S,Y,0,1
PLNSOL,S,Z,0,1
PLNSOL,S,1,0,1
ESEL,S,TYPE,,3                !拾取柱
ETABLE,FI,SMISC,1
ETABLE,FJ,SMISC,7
PLLS,FI,FJ,0.2                !查看轴力
```

分析后得到各项结果如下。

（1）整体变形。

水平地震加速度下，模型的沉降如图 19-41 所示，整体变形如图 19-42 所示。

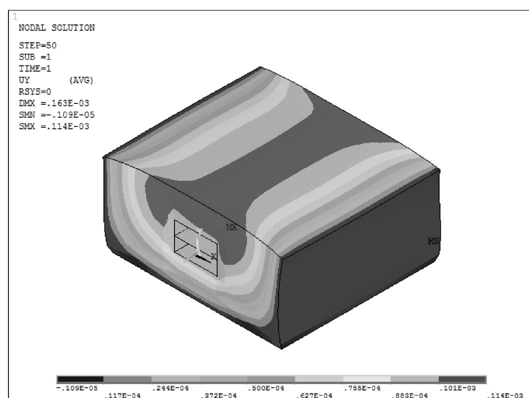


图 19-41 UY 云图

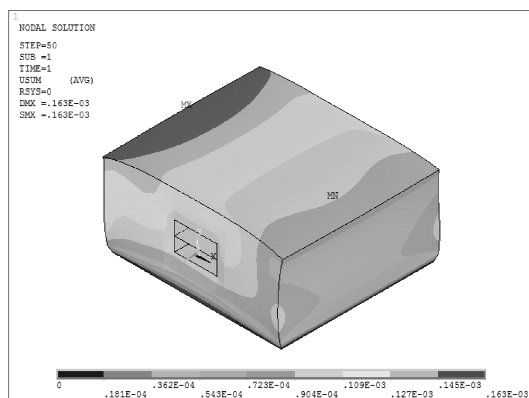


图 19-42 USUM 云图

（2）车站应力分布

X 方向应力如图 19-43 所示，第 1 主应力如图 19-44 所示。

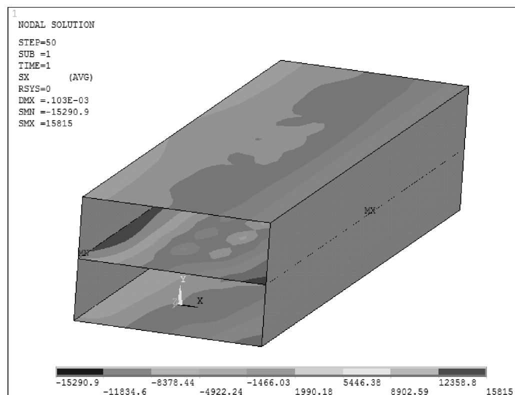


图 19-43 SX 云图

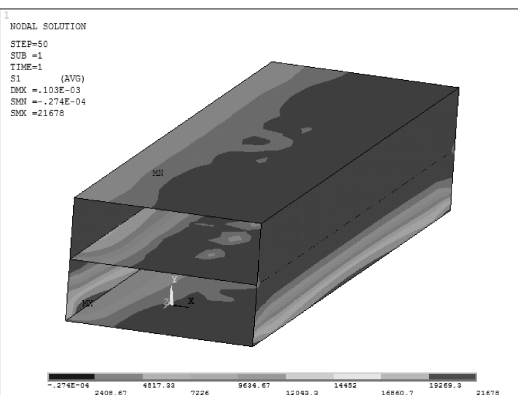


图 19-44 S1 云图

（3）柱子轴力。

柱子轴力如图 19-45 所示。

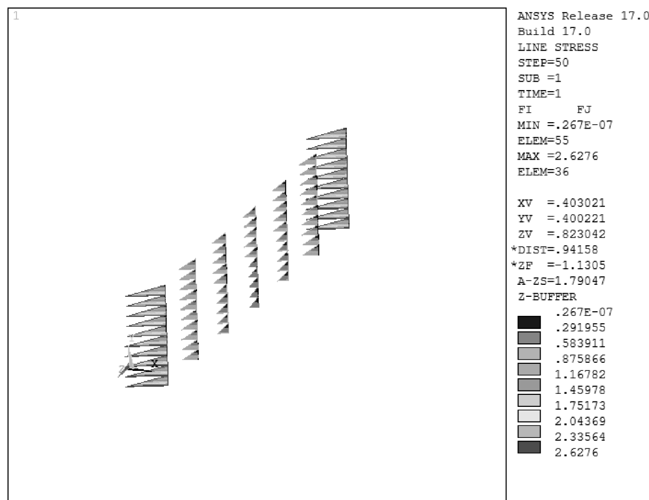


图 19-45 柱子轴力

地震分析主要进行时间历程后处理分析，此处不做过多的一般后处理。

19.2.6 时间历程后处理

以模型正中的点为特征点，即 NODE19，进行地震的时间历程分析。

（1）站台中心竖向位移、速度及加速度分析。

```
/POST26                       !进入时间历程后处理器
/XRANGE,0,1.2                 !设置坐标显示范围
!竖向位移
/AXLAB,Y,UY                   !定义坐标轴名称
NSOL,2,19,U,Y,UY_2            !导入节点 19 的 Y 向位移数据,结果为变量 2
PRVAR,2                       !列表显示变量 2 信息
PLVAR,2                       !绘图显示变量 2 信息
!速度
/AXLAB,Y,VY
DERIV,3,2,1,,,,,1
PRVAR,3
PLVAR,3
!加速度
/AXLAB,Y,AY
DERIV,4,3,1,,,,,1
PRVAR,4
PLVAR,4
```

得到的结果曲线及信息如下。

竖向位移时程曲线如图 19-46 所示，竖向速度时程曲线如图 19-47 所示。

竖向加速度时程曲线如图 19-48 所示。

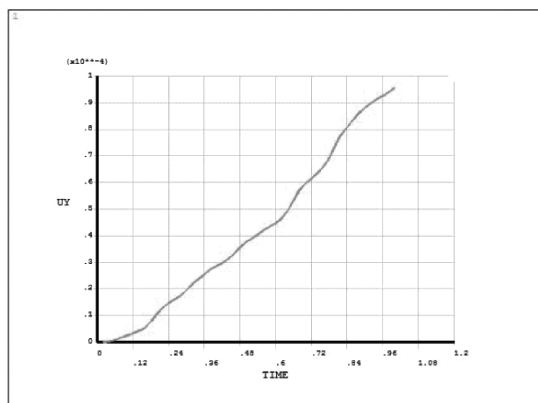


图 19-46　竖向位移时程曲线

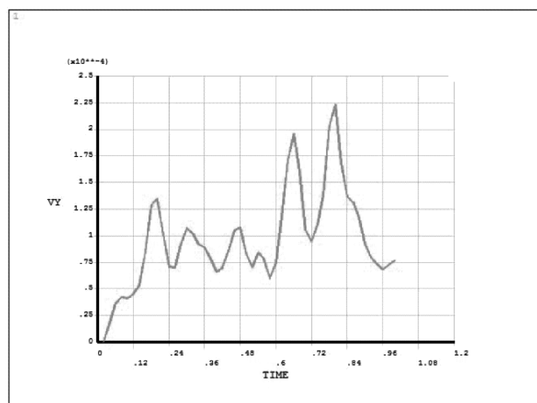


图 19-47　竖向速度时程曲线

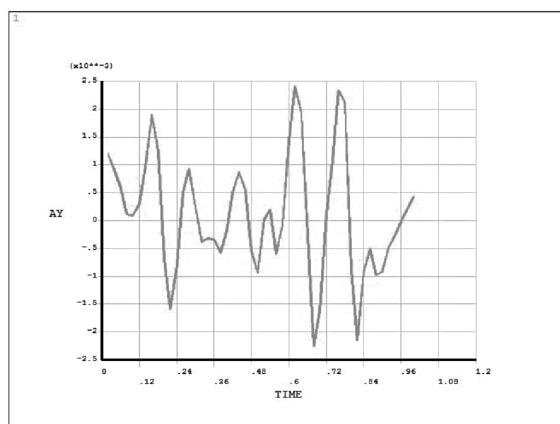


图 19-48　竖向加速度时程曲线

（2）站台中心水平位移、速度及加速度分析。

```
/POST26
/AXLAB,Y,UX
NSOL,2,19,U,X,UX_2
PRVAR,2
PLVAR,2
/AXLAB,Y,VX
DERIV,3,2,1,,,,,1
PRVAR,3
PLVAR,3
/AXLAB,Y,AX
DERIV,4,3,1,,,,,1
PRVAR,4
PLVAR,4
```

得到水平位移时程曲线，如图 19-49 所示；水平速度时程曲线如图 19-50 所示。水平加速度时程曲线如图 19-51 所示。

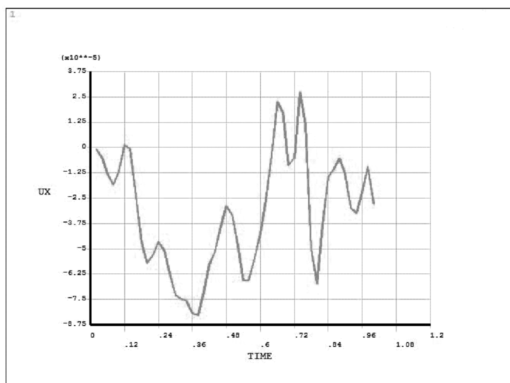


图 19-49 水平位移时程曲线

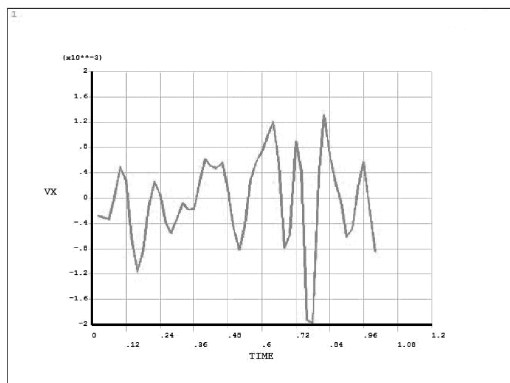


图 19-50 水平速度时程曲线

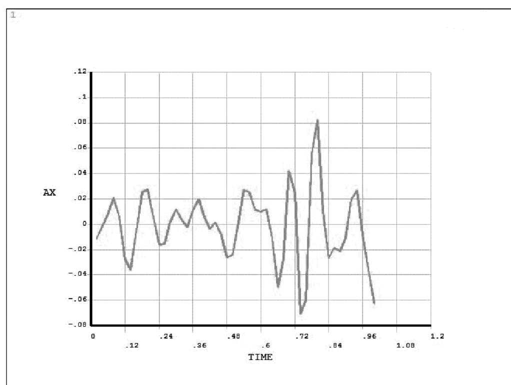


图 19-51 水平加速度时程曲线

由时间历程曲线可以得出各计算量的最大值，由此判断结构的安全性。

19.3 本章小结

本章主要学习了隧道工程相关问题的建模及分析方法。

首先对山体隧道开挖问题进行了仿真分析，充分利用了生死单元功能。通过本例的学习，读者应该熟练掌握该功能的使用方法。

其后对地铁站台进行了地震荷载下的动力分析，并讲述了时间历程后处理的操作方法。

山体隧道开挖及地铁站台的地震响应分析分别是两类工程中最重要的计算环节。由于实际工况错综复杂，本章重点在于提供一种分析思路和软件的操作方法，读者应根据实际情况加以变通，以达到最接近实际的工程仿真效果，保障工程安全。

参 考 文 献

[1] 陆培毅，刘畅，顾晓鲁．深基坑支护结构支撑系统简化空间分析方法的研究[J]．岩土工程学报，2002，24（4）：471－474.

[2] 沈祖炎，陈扬骥，陈以一．钢结构基本原理[M]．北京：中国建筑工业出版社，2000.

[3] 张亚欧，谷志飞，宋勇．ANSYS 7.0 有限元分析实用教程［M］．北京：清华大学出版社，2004.

[4] 王金龙，王清明，王伟章．ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析．北京：机械工业出版社，2010.

[5] 朱伯芳．有限单元法原理和应用［M］.2 版．北京：中国水利水电出版社，1998.

[6] 白葳，喻海良．通用有限元分析 ANSYS 8.0 基础教程［M］．北京：清华大学出版社，2005.

[7] 王勖成，邵敏．有限单元法基本原理和数值方法［M］.2 版．北京：清华大学出版社，1997.

[8] 徐礼华，池寅，李荣渝，苏洁．钢纤维混凝土深梁非线性有限元分析在 ANSYS 中的实现［J］．岩土力学，2008，29（9）：2577－2582.

[9] 卫星，强士中．利用 ANSYS 实现斜拉桥非线性分析［J］．四川建筑科学研究，2003，29（4）：14－16.

[10] 王彦宏，薛建阳，赵鸿铁，等．用 ANSYS 程序进行型钢混凝土偏压柱的有限元分析［J］．哈尔滨工业大学学报，2003，35（s1）：109－112.

[11] 薛建阳，赵鸿铁，杨勇，等．型钢混凝土柱粘结滑移性能及 ANSYS 数值模拟方法研究［J］．建筑钢结构进展，2006，8（5）：8－16.

[12] 博弈创作室．ANSYS 9.0 经典产品基础教程与实例详解［M］．北京：中国水利水电出版社，2006.

[13] 王焕定，吴德伦．有限单元法及计算程序［M］．北京：中国建筑工业出版社，1997.

[14] 王城泉，邹昀，郭翔．型钢混凝土柱的数值模拟分析［J］．山西建筑，2011，37（29）：22－24.

[15] 莫家兴．基于 ANSYS 的钢筋混凝土框架异型节点破坏机理模拟分析［J］．安徽建筑，2010，17（5）：119－121.

[16] 王斌，张伟军．型钢高强高性能混凝土梁的抗剪性能分析［J］．西安工业大学学报，2010，30（6）：534－539.

[17] 姚海，崔小朝，禹海燕，等．用 ANSYS 软件对锚杆－锚固剂－岩体有限元数值模拟［J］．现代矿业，2008，24（5）：59－61.

[18] 李浩月，周田朋，刘相新．ANSYS 工程计算应用教程［M］．北京：中国铁道出版社，2003.

[19] 龚曙光．ANSYS 工程应用实例解析［M］．北京：机械工业出版社，2003.

[20] 王妙芳，郭子雄．型钢混凝土柱的 ANSYS 数值模拟技术［J］．华侨大学学报（自然科学版），2009，30（2）：195－199.

[21] 秦艳．考虑粘结滑移的型钢混凝土柱有限元分析［J］．山西建筑，2009，35（21）：78－79.

[22] 刘建军，叶柏龙，雷雨．型钢混凝土（SRC）深梁数值模拟分析［J］．四川建筑，2009，29（2）：143－145.

[23] 国家质量监督检验检疫总局．GB 50017—2003 钢结构设计规范［S］．北京：中国计划出版社，2003.

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS 17.0 有限元分析从入门到精通 第2版

ANSYS系列已出版

SolidWorks系列
AutoCAD系列
Creo系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

- ANSYS 17.0 有限元分析从入门到精通 第2版
- ANSYS Workbench 17.0 有限元分析从入门到精通 第2版
- ANSYS 18.0有限元分析学习宝典
- ANSYS 17.0有限元分析完全自学手册 第2版
- ANSYS Workbench 17.0 结构仿真分析从入门到精通
- ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例演练
- ANSYS Workbench 16.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 16.1结构分析工程应用实例解析 第4版
- ANSYS 16.0 有限元分析入门·进阶·精通
- ANSYS 15.0 有限元分析完全自学手册
- ANSYS Workbench 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 14.5与HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析 第2版
- ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计
- ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析
- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0 联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0 从入门到实战

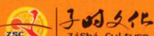

机械工业出版社计算机分社官方微信

关注计算机分社官方微信，回复**58392**即可获取本书配套资源下载链接，并可获得更多增值服务和最新资讯。

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
金 书 网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版


机械工业出版社微信公众号


机工IT互联网工厂微信服务号

上架指导 计算机/辅助设计
ISBN 978-7-111-58392-9
策划编辑◎张淑谦
封面设计◎


51CTO.com
技术成就梦想

ISBN 978-7-111-58392-9

定价：99.00元